HANDBUCH DER EXPERIMENTALPHYSIK

UNTER MITWIRKUNG VON

G. ANGENHEISTER-Potsdam, E. v. ANGERER-München, E. BACK-Tübingen, G. BAKKER-den Haag, A. BECKER-Heidelberg, H. BENNDORF-Graz, P. CERMAK-Gießen, C. CRANZ-Berlin, A. DEFANT-Innsbruck, L. EBERT-Kopenhagen, A. EUCKEN-Breslau, W. FRIEDRICH-Berlin, W. GAEDE-Karlsruhe, W. GERLACH-Tübingen, P. GOERENS-Essen, A. HAAS-Wien, F. HARMS-Würzburg, K. HERZFELD-München, A. HESSEN-Wilhelmshaven, G. HOFFMANN-Königsberg i. Pr., L. HOLBORN-Charlottenburg, G. JAFFÉ-Leipzig, G. JOOS-Jena, A. KÖNIG-Jena, O. KNOBLAUCH-München, F. KOHLRAUSCH-Graz, F. KOSSMAT-Leipzig, F. KRÜGER-Greifswald, M. v. LAUE-Berlin, P. LENARD-Heidelberg, A. LOSCHGE-München, W. MEINARDUS-Göttingen, G. MIE-Freiburg i. Br., W. MILCH-Frankfurt a. M., C. MÜLLER-Charlottenburg, P. NIGGLI-Zürich, L. PRANDTL-Göttingen, C. PULFRICH-Jena, F. RITTER-Charlottenburg, L. SCHILLER-Leipzig, H. SCHULZ-Berlin-Lichterfelde, W. SCHUMANN-München, E. SCHWEIDLER-Innsbruck, R. SEELIGER-Greifswald, M. SIEGBAHN-Upsala, J. STARK-Ullersricht, D. THOMA-München, R. TOMASCHEK-Heidelberg, L. VEGARD-Oslo, E. WARBURG-Charlottenburg, E. WIECHERT-Göttingen, W. WIEN-München.

HERAUSGEGEBEN

VON

W. WIEN UND F. HARMS

MÜNCHEN WÜRZBURG

BAND 1

1926

AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H.

MESS-METHODEN UND MESS-TECHNIK

VON

DR. LUDWIG HOLBORN
DIREKTOR AN DER PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN REICHSANSTALT
CHARLOTTENBURG

MIT 218 ABBILDUNGEN

TECHNIK DES EXPERIMENTS

VON

DR. ERNST VON ANGERER
PRIVATDOZENT AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE MÜNCHEN

MIT 28 ABBILDUNGEN UND 1 TAFEL

1926
AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H.

Vorwort.

Das Handbuch der Experimentalphysik soll das weite Gebiet dieser Wissenschaft, das der einzelne Forscher in seiner dauernd wachsenden Literatur nicht mehr durch eigenes Studium übersehen kann, so darstellen, daß mit möglichster Vollständigkeit alles zusammengefaßt wird, was für wissenschaftliche und technische Arbeit erforderlich ist. Diese Vollständigkeit konnte aber, wenn der Umfang des Werkes nicht zu groß werden sollte, nur auf den eigentlich physikalischen, nicht auf den Grenzgebieten angestrebt werden. Ebenso mußte auf Vollständigkeit verzichtet werden bei der Darstellung der Mechanik, deren mathematisch-analytischer Teil einerseits sowie technischer Teil andererseits zum großen Teil aus der Physik, wenigstens aus der Experimentalphysik, herausfällt. Aus diesem Grunde ist die Mechanik starrer Körper ziemlich kurz behandelt, während von der Bewegung der Flüssigkeiten und den Strukturverhältnissen fester Körper eine ausführlichere Behandlung nach den neuesten Ergebnissen der experimentellen Forschung angestrebt wird. Der den Grenzgebieten angehörenden Geophysik ist ein besonderer Band eingeräumt.

Die theoretische Physik wird nur soweit herangezogen, wie es zum Verständnis der Experimente erforderlich ist. Alle theoretischen Betrachtungen machen daher keinen Anspruch auf Systematik der Darstellung. Der gegenwärtige Zustand der Quantentheorie und der mit ihr zusammenhängenden Gebiete würde auch jeder geschlossenen Darlegung spotten.

Es erschien für den Experimentalphysiker wünschenswert, die allgemeinen Grundlagen der physikalischen Messungen und die Technik der Experimentierkunst in zusammenfassenden Darstellungen voranzustellen, die den ersten Band bilden. Hier ist natürlich Vollständigkeit nicht möglich, weil die Einzelheiten physikalischer Messungen und experimenteller Technik einen nicht unerheblichen Teil der besonderen Darstellungen bilden werden.

Es ist nicht zu erwarten, daß ein Werk von solchem Umfange, bei dem eine größere Zahl von Mitarbeitern zusammen arbeiten müssen, sogleich das angestrebte Ziel erreichen wird. Wir werden den Fachgenossen dankbar sein für Hinweise auf Unrichtigkeiten und Unvollständigkeiten, damit diese später beseitigt werden können.

München und Würzburg, im April 1926.

W. Wien F. Harms.

Inhaltsverzeichnis.

Meßmethoden und Meßtechnik.

[1]) Bezieht sich nur auf Meßverfahren, die so besser als unter Druck zu be-

Inhaltsverzeichnis.

Technik des Experiments.

MESS-METHODEN UND MESS-TECHNIK

VON

LUDWIG HOLBORN

Vorwort.

Die Grundlage der physikalischen Meßverfahren bilden die Einheiten und ihre Maße. Sie nehmen ihren Ausgang von dem Metersystem, das wohl jetzt durchweg in der Wissenschaft durchgeführt ist, wenn sich auch Pfund und Yard trotz fast fünfzigjährigen Bestehens der Meterkonvention noch in der Technik und dem Verkehr der Angelsachsen aufrecht erhalten haben. In dieser Beziehung ist die Entwicklung günstiger auf elektrischem Gebiete verlaufen, wo keine alten Einrichtungen zu überwinden waren. Hier hat sich verhältnismäßig schnell mit dem Emporblühen der Elektrotechnik ein international anerkanntes System von Einheiten und Maßen durchgesetzt. Sie wurden im Wesentlichen von den nationalen Laboratorien Amerikas, Deutschlands und Englands ausgebildet, während das Metersystem der Pflege eines internationalen Instituts anvertraut war, das mit der Meterkonvention ins Leben trat.

In der Thermometrie machte die Meterkonvention einen Ansatz zu einer internationalen Temperaturskala, als die Wasserstoffskala für Messungen zwischen 0° und 100° eingeführt wurde. Später sind die andern Temperaturbereiche von den nationalen Instituten und dem Kältelaboratorium in Leiden so umfassend bearbeitet worden, daß eine weitgehende Übereinstimmung über die thermischen Meßverfahren und ihre Ergebnisse erreicht worden ist.

Im Rückstande ist die Lichtmessung geblieben. Hier bildeten anfangs die verschiedenartigen, im Gebrauche befindlichen Flammenmaße ein Hindernis für die Einheitlichkeit. Die Versuche, diese Maße durch die Viollesche Einheit zu ersetzen, hatten keinen Erfolg, weil es nicht gelang, diese Einheit für den Gebrauch zu verwirklichen. So ist in Deutschland das alte Flammenmaß, die Hefnerlampe, in Anwendung geblieben, während Amerika, England und Frankreich eine davon verschiedene Einheit benutzen, welche, wenn auch ursprünglich als ein Teil der Violleschen Einheit definiert, nur durch ein willkürliches Maß,

Bei der Darstellung der Meßverfahren war eine Beschränkung auf das Grundsätzliche geboten, einerseits um die Übersicht zu wahren, anderseits um den folgenden Teilen des Buches nicht vorzugreifen.

Um den Text nicht zu sehr mit Literaturhinweisen zu belasten, sind vielfach nur die neueren angeführt, wenn diese hinreichende Hinweise auf ältere Arbeiten enthalten. Jedoch wurden die für die Entwicklung der Meßtechnik wichtigen Daten und Autoren im Text erwähnt.

Berlin-Charlottenburg, im April 1926.

L. Holborn.

Erstes Kapitel.

Einheiten.

1. Grundeinheiten und ihre Maße.

Eine Größe messen heißt ihr Verhältnis zu einer Größe derselben Art bestimmen, die als Einheit gilt. Man kann also gleichsam jede Größe als ein Produkt der Einheit und einer Zahl betrachten und stellt durch die Messung diese Zahl fest.

Die Einheiten werden durch Grundmaße (Étalons, Standards) verwirklicht, die man lange Zeit ziemlich willkürlich wählte, so daß ihre allgemeine Verbreitung und ihre genaue Wiederherstellung erschwert war, bis man dazu überging, für die Grundmaße allgemein zugängliche, unveränderliche Naturgrößen einzuführen. Von Bedeutung für die Folgezeit wurde das Vorgehen des französischen Konvents im Jahre 1795, der für das Urmaß der Länge das Meter, den zehnmillionsten Teil des Erdquadranten, und für das Urmaß der Masse das Kilogramm, das Kubikdezimeter Wasser bei dem Maximum seiner Dichte, einführte. Diese Grundmaße haben sich, namentlich infolge ihrer dezimalen Einteilung durchgesetzt: durch die im Jahre 1875 abgeschlossene Meterkonvention fanden sie Eingang bei 17 Staaten; heute gehören dieser Vereinigung über 40 an.

Die Meterkonvention hat neue Maße des Meters und des Kilogramms anfertigen lassen und dem im Breteuil eingerichteten internationalen Maß- und Gewichtsbureau zur Aufbewahrung und Messung übergeben. Ferner besitzen alle Teilnehmer der Konvention Kopien, welche im Bureau mit den Urmaßen verglichen werden.

Wie spätere Messungen ergeben haben, entsprechen die Urmaße in ihrer Verwirklichung nicht ganz den ursprünglichen Festsetzungen: das Meter ist um $^1/_5$ mm kürzer als $1 \cdot 10^{-7}$ des Erdquadranten und das Kilogramm um 27 mg schwerer als das Kubikdezimeter Wasser von 4°. Diese kleinen Unterschiede, die sich aus der Schwierigkeit der Messung erklären, spielen bei den meisten Verwendungen keine Rolle und rechtfertigen keine Änderung, da in diesen Grenzen selbst für den wissenschaftlichen Gebrauch die Stetigkeit wichtiger ist als die genaue Über-

Das Meter, das Kilogramm und die aus dem astronomischen Gebrauch entlehnte Sekunde mittlerer Sonnenzeit haben die Maße für die drei Grundeinheiten von Länge, Masse und Zeit abgegeben, auf die man sich zu beschränken suchte, soweit es möglich war. Wir werden sehen, daß man darin reichlich weit gegangen ist, wenn auch zugegeben ist, daß eine große Anzahl voneinander unabhängiger Einheiten keinen praktischen Nutzen gewährt und daß sich für viele Einheiten keine Grundmaße verwirklichen lassen.

Auch haftet der Beschränkung auf die Dreizahl von Länge, Masse und Zeit natürlich eine gewisse Willkür an. Denn es wäre möglich, die Zahl noch weiter zu verringern. So eliminiert man z. B. bei astronomischen Untersuchungen oft noch die Einheit der Masse und führt sie mit Hilfe des Newtonschen Gesetzes auf die Einheiten der Länge und der Zeit zurück, die allein als Grundeinheiten übrigbleiben.

Ebenso kann die Auswahl von drei Grundeinheiten noch anders ausfallen. In dieser Beziehung folgt z. B. die Technik der Physik nicht. Dem technischen Maßsystem liegen vielmehr die Einheiten der Länge, der Kraft und der Zeit zugrunde, deren Grundmaße das Meter, das Gewicht des Kilogramms (kg*) im Meeresniveau der Breite von 45° und die Sekunde mittlerer Sonnenzeit bilden.

In der Wärmelehre benutzt man jetzt wohl allgemein als vierte Grundeinheit den Temperaturgrad, da er nicht ohne Zwang aus den mechanischen Einheiten abzuleiten ist.

2. Abgeleitete Einheiten.

Aus den Grundeinheiten wird eine große Zahl abhängiger Einheiten mit Hilfe der Gleichungen abgeleitet, die ihre physikalischen Beziehungen ausdrücken. Bezeichnet man, wie gebräuchlich, die Einheiten mit eckigen Klammern, also die der Länge mit [l], der Masse mit [m] und der Zeit mit [t], so folgt für die Geschwindigkeit $[l\,t^{-1}]$, für die Kraft $[l\,m\,t^{-2}]$, für die Dichte $[l^{-3}\,m]$ usw. Die Exponenten von l, m und t heißen Dimensionen der Einheit in bezug auf Länge, Masse und Zeit. Sie bilden ein bequemes Mittel, die Gleichungen, welche die physikalischen Gesetze darstellen, zu überprüfen. Denn diese Gleichungen müssen sich in bezug auf die Dimensionen der darin vorkommenden Größenarten als homogen erweisen. Selbst bei der Ableitung eines Naturgesetzes kann diese Forderung, wenn die ins Spiel kommenden Größen bekannt sind, wertvolle Hinweise auf die endgültige Form des Gesetzes liefern[1]).

---

[1]) A. Einstein, Ann. Phys. 35, 686. 1911. — C. Runge, Phys. ZS. 25, 202. [illegible]

Ferner geben die Dimensionen einer Einheit an, wie sich ihr Zahlenwert ändert, wenn man zu Vielfachen oder Teilen der Grundeinheit übergeht, also z. B. von den Einheiten des Zentimeters, des Gramms und der Sekunde, die jetzt allgemein in der Physik zugrunde gelegt werden, etwa zu Meter, Tonne und Sekunde, die für das gesetzliche französische Maß gebraucht werden. Enthält die umzurechnende abgeleitete Einheit die Länge zur Potenz m und die Masse zur Potenz n, so würde sich der Zahlenwert im Verhältnis $1 \cdot 100^{-m} \cdot 1\,000\,000^{-n}$ ändern.

3. Mechanische und Wärmeeinheiten.

Die auf Zentimeter, Gramm und Sekunde gegründeten Einheiten, kurz als CGS-System bezeichnet, werden in der folgenden Tabelle aufgeführt. Nur ein Teil davon ist besonders benannt worden. In der letzten Spalte ist der Zahlenwert der technischen Einheit angegeben, welcher der CGS-Einheit gleichkommt.

Größe		CGS-Einheit	Technische Einheit
Geschwindigkeit . . .	v	$cm \cdot s^{-1}$	10^{-2} m s
Beschleunigung . . .	b	$cm \cdot s^{-2}$	10^{-2} m s^{-2}
Kraft	P	$cm \cdot g \cdot s^{-2}$ = Dyn	$1{,}0198 \cdot 10^{-6}$ kg*
Druck	p	$cm^{-1} \cdot g \cdot s^{-2}$ = Bar	$1{,}0198 \cdot 10^{-6}$ kg* $\cdot cm^{-2}$
Arbeit	A	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-2}$ = Erg	$1{,}0198 \cdot 10^{-8}$ m kg*
Wärmemenge	Q		$2{,}390 \cdot 10^{-8}$ cal

Für die Wärmemenge wird neben der CGS-Einheit, die meistens für die mechanische Energieform verwandt wird, noch die Kalorie (cal) als Einheit benutzt; es ist diejenige Wärmemenge, die 1 g Wasser von 14,5° auf 15,5° erwärmt. Doch kommt statt dessen immer mehr in Anwendung die elektrische Einheit, die Wattsekunde oder das Joule, die im folgenden Abschnitt erklärt wird. Es besteht die Beziehung: 1 Erg = 10^{-7} Joule = $2{,}390 \cdot 10^{-8}$ cal.

4. Magnetische und elektrische Einheiten.

Die magnetischen und elektrischen Einheiten hat man auf die mechanischen zurückgeführt. Den Anfang damit machte Gauss (1836), als er die erdmagnetische Feldstärke auf die Grundeinheiten von Länge, Masse und Zeit bezog und die bis dahin gebräuchlichen willkürlichen Einheiten durch diese „absoluten" ersetzte. Davon rührt der Name „absolutes Maßsystem" her, der weiter keine tiefere Bedeutung hat.

Gauss ging aus von dem Gesetz $P = \frac{m_1 \cdot m_2}{a^2}$, welches die Kraft P darstellt, die zwei magnetische Massen m_1 und m_2 in der Entfernung a

eine gleiche im Abstande Eins die Einheit der Kraft ausübt Hieraus folgt für die Einheit der magnetischen Polstärke: $[\mathfrak{m}] = [l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1}]$

In derselben Weise leitete W. WEBER (1846) aus dem COULOMBschen Gesetz. $P' = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{a^2}$, nach dem zwei Elektrizitätsmengen Q_1 und Q_2 in der Entfernung a aufeinander wirken, für die Einheit dieser Größenart die Beziehung ab: $[Q] = [l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1}]$, die zu einem System der elektrischen Einheiten, dem elektrostatischen, führte

In das System der magnetischen Einheiten wurden die elektrischen einbezogen mit Hilfe des Biot-Savartschen Gesetzes, wonach die transversale Kraft P″, welche die Länge l des Stromleiters I auf den Magnetpol $\mathfrak{m}$ in der Entfernung a ausübt, dargestellt wird durch die Gleichung $P'' = \frac{I\, l\, \mathfrak{m}}{a^2}$, woraus folgt $[I] = [l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1}]$. Dieses Einheitensystem heißt deshalb das elektromagnetische.

Daß die Dimensionen der Ausgangseinheiten $\mathfrak{m}$ und Q beider Systeme übereinstimmen, rührt daher, daß in dem elektromagnetischen die Dimension der Permeabilität μ, in dem elektrostatischen die der Dielektrizitätskonstante ε unterdrückt ist[1]). Schreibt man vollständiger $P = \frac{\mathfrak{m}_1 \cdot \mathfrak{m}_2}{\mu\, a^2}$ und $P' = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\varepsilon\, a^2}$, so ergibt sich für die Einheitengleichungen: $[\mathfrak{m}] = [l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}]$, $[Q] = [l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \varepsilon^{\frac{1}{2}}]$.

Die folgende Tabelle enthält die Einheitenformeln für die hauptsächlichen magnetischen und elektrischen Größen, in denen μ und ε beibehalten sind. Diese Ausdrücke geben für $\mu = 1$ und $\varepsilon = 1$ die Dimensionen in dem absoluten elektromagnetischen und elektrostatischen System, sind aber in ihrer größeren Allgemeinheit viel brauchbarer, um die physikalischen Gleichungen auf die Richtigkeit der Dimensionen zu prüfen.

Größe	Elektrostatisch	Elektromagnetisch
Elektrizitätsmenge Q	$l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \varepsilon^{\frac{1}{2}}$	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Dielektrizitätskonstante ε	ε	$l^{-2} t^{2} \mu^{-1}$
Elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$	$l^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \varepsilon^{-\frac{1}{2}}$	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-2} \mu^{\frac{1}{2}}$
Elektromotorische Kraft E	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \varepsilon^{-\frac{1}{2}}$	$l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-2} \mu^{\frac{1}{2}}$
Elektrische Verschiebung $\mathfrak{D}$	$l^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \varepsilon^{\frac{1}{2}}$	$l^{-\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Elektrische Kapazität C	$l\, \varepsilon$	$l^{-1} t^{2} \mu^{-1}$

(Fortsetzung s. S. 5.)

(Fortsetzung.)

Größe	Elektrostatisch	Elektromagnetisch
Strom I	$l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-2} \varepsilon^{\frac{1}{2}}$	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Widerstand R	$l^{-1} t \varepsilon^{-1}$	$l t^{-1} \mu$
Induktivität L	$l^{-1} t^{2} \varepsilon^{-1}$	$l \mu$
Magnetische Polstärke m	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{-\frac{1}{2}}$	$l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$
Magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-2} \varepsilon^{\frac{1}{2}}$	$l^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Magnetomotorische Kraft M	$l^{\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-2} \varepsilon^{\frac{1}{2}}$	$l^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Magnetische Permeabilität μ	$l^{-2} t^{2} \varepsilon^{-1}$	μ
Magnetische Induktion $\mathfrak{B}$	$l^{-\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{-\frac{1}{2}}$	$l^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$
Magnetisierung $\mathfrak{J}$	$l^{-\frac{3}{2}} m^{\frac{1}{2}} \varepsilon^{-\frac{1}{2}}$	$l^{-\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{2}} t^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$

Aus der Tabelle ergibt sich, daß $[\varepsilon^{-\frac{1}{2}} \; \mu^{-\frac{1}{2}}] = [l \, t^{-1}]$ d. h. der Dimension einer Geschwindigkeit, die nach der experimentellen Bestimmung der Geschwindigkeit c des Lichts gleichkommt. Es ist $c = 2{,}9982 \cdot 10^{10}$ cm s^{-1}. Das Verhältnis der Dimensionsformel der elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten beträgt eine positive oder negative Potenz von c.

5. Praktische elektrische Einheiten.

Die Größe der elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten des CGS-Systems erwies sich für den technischen Gebrauch als ungeeignet. Aus dem elektromagnetischen hat man deshalb ein praktisches System gebildet, indem als Grundeinheiten 10^9 cm, 10^{-11} g und sek angenommen wurden. Auch die daraus abgeleiteten Einheiten sind nicht durchweg bequem. Das System ist deshalb auch nicht streng durchgeführt, namentlich behielt man die magnetischen CGS-Einheiten bei. Aber auch manche elektrische Größen werden noch oft in CGS-Einheiten ausgedrückt. Die folgende Tabelle enthält die praktischen elektrischen Einheiten nebst ihrer Beziehung zu den beiden CGS-Systemen.

Größe	Praktische Einheit	Anzahl der elektromag. CGS	Anzahl der elektrostat. CGS
Widerstand R	Ohm	10^{9}	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$
Stromstärke I	Ampere	10^{-1}	$3 \cdot 10^{9}$
Elektrizitätsmenge Q	Coulomb	10^{-1}	$3 \cdot 10^{9}$
Elektromotorische Kraft E	Volt	10^{8}	$3{,}33 \cdot 10^{-3}$
Kapazität C	Farad	10^{-9}	$9 \cdot 10^{11}$
Induktivität L	Henry	10^{9}	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$
Leistung EI = N	Watt	10^{7}	10^{7}

In der Meßkunde ist es als Bedürfnis empfunden worden, für die pra tischen Einheiten des Widerstandes, der Stromstärke und der Spannu Grundmaße zu besitzen. Die Genauigkeit, mit der sich diese Grundma entsprechend der Festsetzung der von ihnen dargestellten Einheiten Vielfache der CGS-Einheiten verwirklichen lassen, hat sich natürlich r dem Fortschritt der elektrischen Meßkunde verfeinert. Aber auch h hat man es nicht für zweckmäßig gehalten, die Grundmaße entspreche ihrer genauen Bestimmung als Vielfache der CGS-Einheit zu ände sondern ist bei einer gewissen Annäherung stehengeblieben. In die Form haben die elektrischen Grundmaße in die Gesetzgebung der Staat Eingang gefunden und sind später durch die Londoner Konferenz (19 international vereinbart worden.

Danach gilt als „internationales Ohm" der Widerstand einer Que silbersäule von der Temperatur des schmelzenden Eises, deren Länge gleichmäßigem Querschnitt 106,300 cm und deren Masse 14,4521 beträgt.

Die Einheit der elektrischen Stromstärke, das „internationale Ampe wird durch den konstanten Strom dargestellt, der bei dem Durchga durch eine wäßrige Lösung von Silbernitrat in 1 Sekunde 0,001 118 0 Silber niederschlägt.

Das „internationale Volt" ist diejenige konstante Spannungsdiffere welche in einem Leiter von einem internationalen Ohm Widersta einen konstanten Strom von einem internationalen Ampere herv bringt.

Das „internationale Watt" ist die Leistung, die ein konstanter ele trischer Strom von einem internationalen Ampere bei einer elektrisch Spannungsdifferenz von einem internationalen Volt verrichtet.

An das deutsche Gesetz vom 1. Juni 1898, das diesen Festsetzung entspricht, schließen sich noch folgende Bestimmungen über die ab leiteten Einheiten:

Die Elektrizitätsmenge, welche bei einem Strome von einem Amp in einer Sekunde durch den Querschnitt fließt, heißt Amperesekur (Coulomb); die in einer Stunde hindurchfließende Menge heißt Ampe stunde.

Die Arbeit von einem Watt während einer Sekunde heißt eine Wa sekunde.

Die Kapazität eines Kondensators, welcher durch eine Amperesekur auf ein Volt geladen wird, heißt Farad.

Der Induktionskoeffizient eines Leiters, in welchem ein Volt induzi wird durch die gleichmäßige Änderung um eine Ampere in der Sekun

Für die Meßkunde ist allein das System der internationalen Einheiten von Bedeutung. Sein Zusammenhang mit den absoluten Einheiten bietet nur noch historisches Interesse; die Unterschiede zwischen den beiden Maßsystemen sind indessen so gering, daß sie praktisch gar nicht und wissenschaftlich nur selten Bedeutung haben. Nach den vorliegenden Messungen ist mit einer Genauigkeit von etwa $1 \cdot 10^{-4}$ zu setzen:

1 intern. Ohm	= 1,0005 abs. Ohm	= $1{,}0005\ \mathrm{CGS} \cdot 10^{9}$
1 intern. Ampere	= 1,0000 abs. Ampere	= $1{,}0000\ \mathrm{CGS} \cdot 10^{-1}$
1 intern. Volt	= 1,0005 abs. Volt	= $1{,}0005\ \mathrm{CGS} \cdot 10^{8}$
1 intern. Farad	= 0,9995 abs. Farad	= $0{,}9995\ \mathrm{CGS} \cdot 10^{-9}$
1 intern. Henry	= 1,0005 abs. Henry	= $1{,}0005\ \mathrm{CGS} \cdot 10^{9}$
1 intern. Watt	= 1,0005 abs. Watt	= $1{,}0005\ \mathrm{CGS} \cdot 10^{7}$

6. Praktische magnetische Einheiten.

Als praktische Einheiten auf dem Gebiete des Magnetismus dienen die CGS-Einheiten. Die Vorschläge für die Benennung haben mehrfach gewechselt. Zur Zeit wird in Übereinstimmung mit den Beschlüssen des Pariser elektrischen Kongresses (1900) die CGS-Einheit der magnetischen Feldstärke mit Gauß und die des magnetischen Induktionsflusses mit Maxwell bezeichnet. Vielfach wird gleichzeitig die Einheit der Induktion nach Gauß benannt, was sich damit rechtfertigen läßt, daß die Permeabilität im elektromagnetischen System als reine Zahl erscheint. Es kann jedoch nicht in Abrede gestellt werden, daß die Anwendung desselben Namens auf zwei verschiedenartige Einheiten zu Mißverständnissen führen kann.

Folgerichtig wäre es, die praktischen elektrischen Einheiten auch auf den Magnetismus anzuwenden. Für die CGS-Einheit der magnetischen Induktion wäre alsdann $\mathrm{Volt}\ \mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{s} \cdot 10^{-8}$ und für die des Induktionsflusses $\mathrm{Volt} \cdot \mathrm{s} \cdot 10^{-8}$ zu setzen.

Die Feldstärke pflegt man außerdem in Amperewindungen/cm auszudrücken, einer Einheit, die aus den übrigen Systemen herausfällt; es ist $1\ \mathrm{Gauß} = 1/0{,}4\pi \cdot \mathrm{AW} \cdot \mathrm{cm}^{-1}$.

7. Lichteinheiten.

Eine punktförmige Lichtquelle möge in den unendlich kleinen körperlichen Winkel $d\omega$ den Lichtstrom $d\Phi$ senden. Dann bezeichnet man $J = d\Phi/d\omega$ als Lichtstärke der Quelle; sie ist gleich der Dichte des Lichtstromes im Raumwinkel.

Die Einheit der Lichtstärke bildet in Deutschland die Hefnerkerze (HK); eine punktförmige Lichtquelle von 1 HK sendet die Einheit des Lichtstroms, ein Lumen (Lm) (früher Meterkerze) in die Einheit des räum-

Raumes gleichmäßig strahlt, ist $J_O = \Phi/4\pi$. Bei ungleichmäßiger Beleuchtung stellt der Quotient die mittlere räumliche Lichtstärke dar die mit J_O bezeichnet wird.

Die Beleuchtung E eines Flächenelements d F ist die Lichtstromdichte der Fläche, also $E = d\Phi/dF$. Sendet eine punktförmige Lichtquelle von der Stärke J aus der Entfernung a unter dem Einfallswinkel i einen Lichtstrom auf die Fläche, so ist $E = J \cos i/a^2$. Steht eine Lichtquelle von der Stärke 1 HK einer ebenen Fläche in dem Abstand von 1 m gegenüber, so empfängt das Flächenstück, auf welches das Licht senkrecht auftrifft, die Einheit der Beleuchtung, die als Lux (Lx) bezeichnet wird.

Die Flächenhelle e einer gleichmäßig leuchtenden Fläche F, welche die Lichtstärke J unter dem Ausstrahlungswinkel ε aussendet, wird durch $e = J/(F \cos \varepsilon)$ dargestellt. Ein Quadratzentimeter einer Fläche von der Helle 1 HK/cm² sendet in senkrechter Richtung 1 HK aus.

In Amerika ist als Einheit der Flächenhelle noch das Lambert gebräuchlich. Es kommt einer Fläche zu, die 1 Lumen/cm² ausstrahlt oder spiegelt. In letzterem Falle wäre hierzu eine Fläche von dem vollkommen diffusen Reflexionsvermögen 1 mit 1 Lm/cm² = 10000 Lm/m² = 10000 Lx zu beleuchten.

Größe	Formel	Einheit
Lichtstärke	$J = \frac{d\Phi}{d\omega}$	Hefnerkerze (HK)
Lichtstrom	$\Phi = J\omega$	Lumen (Lm)
Beleuchtung	$E = \frac{d\Phi}{dF} = \frac{J \cos i}{a^2}$	Lux (Lx)
Flächenhelle	$e = \frac{J}{F \cos \varepsilon}$	HK/cm²

Die Lichtstärke ist vom menschlichen Auge abhängig und bedarf deshalb zu ihrer Messung einer besonderen Grundeinheit. In bezug auf diese besteht noch keine so allgemeine Übereinstimmung wie auf anderen Gebieten. Als Maß für die Lichteinheit dienten anfangs Walrat-, Stearin- oder Paraffinkerzen, deren Lichtstärke zeitlich und örtlich ziemlich beträchtlichen Schwankungen unterlag. Später kamen Lampen mit flüssigen Brennstoffen in Gebrauch: in Frankreich die Carcellampe (Dumas und Regnault 1842), in England die Pentanlampe (Harcourt 1877) und in Deutschland die Hefnerlampe (v. Hefner-Alteneck 1884). Nach der Festsetzung der internationalen Lichtmeßkommission in

Inzwischen war man bemüht, die Lichteinheit durch die Strahlung des glühenden Platins darzustellen Nach dem Vorschlag von VIOLLE (1879) sollte als Einheit des weißen Lichtes diejenige Lichtstärke gelten, die 1 cm^2 der Oberfläche geschmolzenen Platins im Zustande des Erstarrens in senkrechter Richtung aussendet. Mit Rücksicht auf die Größe der gebräuchlichen Normalkerze wurde auf dem internationalen Elektrikerkongreß zu Paris im Jahre 1889 der zwanzigste Teil der Violleschen Einheit unter dem Namen „bougie décimale" als praktische Einheit empfohlen und zu Genf 1896 bestätigt. Dieser Beschluß ist nicht durchgedrungen, weil es bis jetzt nicht gelungen ist, weder die Viollesche Einheit selbst, noch ihre zahlreichen Modifikationen zu verwirklichen, so daß für die Einheit das Grundmaß fehlt.

Im Jahre 1909 kamen das amerikanische Bureau of Standards, das englische National Physical Laboratory und das französische Laboratoire Central d'Électricité überein, ihren Messungen dieselbe Lichteinheit 1 american candle = 1 pentan candle = 1 bougie décimale zugrunde zu legen. Das Maß dieser Einheit, die man als internationale Kerze bezeichnete, wurde als das Mittel der Lichtstärken einer Reihe von Glühlampen festgesetzt, die in den einzelnen Instituten niedergelegt wurden In Deutschland gilt weiter als Einheit die Hefnerkerze, das ist die Lichtstärke, welche die mit Amylazetat gespeiste Hefnerlampe bei einer Flammenhöhe von 40 mm in horizontaler Richtung ausstrahlt Es besteht die Beziehung: 1 intern. Kerze = 1,11 HK. Eine Vertauschung der internationalen Kerze mit der Hefnerkerze ändert natürlich auch die Werte von Lumen und Lux.

I. Mechanik.

Zweites Kapitel.

Länge.

1. Maßstäbe.

Die Einheit der Länge, das Meter, ist verwirklicht durch das int nationale Urmaß aus einer Legierung von 90% Platin und 10% Iridiu das im Internationalen Bureau zu Breteuil aufbewahrt wird. Der Stab v X-Querschnitt (Fig. 1) und 102 cm Länge weist an jedem Ende zv Striche auf, die auf der in der Mitte gelegenen Ebene gezog sind. Diese stellt die neutrale Schicht des Stabes dar und li etwas unsymmetrisch, so daß sie den Schwerpunkt enthä

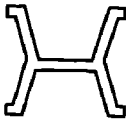



Fig. 1. Urmeter (Querschnitt)

Der Guß von 230 kg Platiniridium, aus dem das Urm hergestellt wurde, lieferte 30 Stäbe, aus denen die Kop gewählt wurden, welche man den Teilnehmern der Met konvention überwies.

Das Meter ist definiert als die Entfernung zwischen einem bestimmt Strichpaare der Enden bei der Temperatur des schmelzenden Eis für die Temperatur t wird die Entferung l_t dargestellt durch die Gleichur $l_t = 1\text{ m} + (8{,}651\,t + 0{,}00100\,t^2)\,10^{-6}$.

Als gesetzliches Maß des Deutschen Reiches gilt die Kopie Nr. die in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt aufbewahrt wi Für sie gilt nach neuerer Vergleichung.

$$l_t = 1\text{ m} - (1{,}72 - 8{,}642\,t - 0{,}001\,t^2)\,10^{-6}.$$

Die Haltbarkeit des Urmaßes ist nicht sicher gewährleistet, sow aus der Wiederholung von Vergleichen mit den Kopien geschlossen werc kann. Die Veränderung einzelner Stäbe übertrifft die Genauigkeit (Messung, die etwa 0,1 μ beträgt, bleibt jedoch wahrscheinlich un 0,5 μ = 0,0005 mm.

Für die praktischen Längenmessungen werden Strichmaßstäbe benut deren Genauigkeit ihrem Zweck entsprechend abgestuft ist: für fe Messungen dienen Metallstäbe, in besonderen Fällen aus Legierun

sonst aus Stahl, Messing oder Silber, wobei das letzte Metall als schmaler Streifen in einen breiteren Messingstab eingelegt wird; für roheren Gebrauch wendet man Maßstäbe aus Holz an, für welche die Änderung durch die Temperatur (3 bis $10 \cdot 10^{-6}$/Grad) keine Rolle mehr spielt, mehr die durch Feuchtigkeit bewirkte, welche bei Fichte und Ahorn am kleinsten (0,02%), Eiche und Pappel am größten ist. Bei Teilungen, die für die Ablesung mit bloßem Auge bestimmt sind, empfiehlt es sich nicht, unter Millimeterabstand herunterzugehen. Denn damit zwei Striche in der deutlichen Sehweite (250 mm) noch getrennt gesehen werden, muß ihr Abstand, da der kleinste Sehwinkel 50″ beträgt, mindestens $250 \cdot 50/206\,265 = 0{,}065$ mm betragen, so daß $^1/_2$-mm-Teilung ohne Benutzung einer Lupe zu fein ist.

Metallmaßstäbe hat man früher entsprechend der Definition des Meters so abgeglichen, daß die Länge dem Sollwert bei 0° entsprach. Die Technik vieler Länder, auch diejenige Deutschlands ist jetzt davon abgegangen: die Maßstäbe weisen den Sollwert bei 20° auf. In den Werkstätten, wo eiserne Gegenstände mit eisernen Maßstäben gemessen werden, übt die Temperatur keinen Einfluß auf die Messung aus, wenn darauf geachtet wird, daß sich Werkstück und Maßstab auf derselben Temperatur befinden.

Bei genauen Messungen ist die Lagerung der Maßstäbe von Bedeutung, weil davon ihre Durchbiegung abhängt. Diese ist am kleinsten bei der Auflage der Stäbe in den Besselschen Punkten ($^2/_9$ der Länge von den Enden entfernt). Am günstigsten sind dabei diejenigen Formen mit X- oder H-Querschnitt, bei denen die Teilung in der neutralen Schicht angebracht ist. Diese wird zwar bei der Auflage deformiert, aber in ihrer Länge nicht geändert. Für die horizontale Projektion des Abstandes l zwischen den Teilstrichen des deformierten Stabes, die gemessen wird, beträgt die Längenänderung $\Delta l = -0{,}000\,000\,66 \dfrac{G^2 l^3}{J^2 E^2}$,

wo G das Gewicht der Stablänge, J das Trägheitsmoment seines Querschnittes in bezug auf die horizontale Mittelachse und E der Elastizitätsmodul bezeichnet. Bei den Meterstäben aus Platiniridium mit X-förmigem Querschnitt ist Δl kleiner als 1 mμ; für den H-förmigen Querschnitt ist $\Delta l = -0{,}0007\,\mu$, für dieselbe Form aus Stahl ist Δl zehnmal kleiner. Bei der Auflage an den Enden erhöht sich die Korrektion beträchtlich: für das Platiniridiummeter z. B. auf $-0{,}46\,\mu$, für die H-Form aus Stahl auf $0{,}04\,\mu$[1]).

---

[1]) G. Berndt u. H. Schulz, Grundlagen und Geräte technischer Längen-

Strichmaßstäbe werden als Normalmaße erst seit der Herstellung des jüngsten Urmeters benutzt. Vorher hat man sich für diesen Zweck der Endmaße bedient, mit diesen jedoch schlechte Erfahrungen gemacht, da sie sich während des Gebrauchs beträchtlich durch Abnutzung änderten. Neuerdings haben die Endmaße jedoch wieder viel Eingang gefunden, und zwar seitdem es JOHANSSON, dem Inspektor der schwedischen Waffenfabrik in Eskilstuna, gelungen war, Endmaße von früher nie erreichter Genauigkeit und großer Haltbarkeit fabrikmäßig herzustellen (1911). Sie waren in erster Linie für das Bedürfnis der Werkstätten bestimmt, welche in bedeutendem Umfang angefangen hatten, nach Lehren zu arbeiten, um ihre Erzeugnisse beliebig austauschen zu können. Als solche Lehren benutzte man anfangs Zylinder aus gehärtetem Stahl mit kugelförmigen Endflächen, deren Halbmesser gleich der halben Zylinderlänge waren, so daß das Endmaß von der Neigung nicht abhing. Die JOHANSSONschen Maße bestehen auch aus gehärtetem Stahl, bilden aber viereckige Prismen mit Endflächen von solcher Ebenheit, daß die Klötze, aneinandergeschoben, durch Adhäsion fest zusammenhaften Zur Trennung der Stücke ist eine Kraft von 10—15 kg nötig. Auf diese Weise stellt jeder Klotz nicht nur ein einziges Maß dar, sondern liefert mit einer Reihe anderer zusammengesetzt die Möglichkeit, ebenso wie bei Strichmaßen Vielfache und Bruchteile zu bilden.

Diese Endmaße von etwa 9×30 mm Querschnitt, die außer in Eskilstuna heute auch von den Werkstätten anderer Länder in derselben Vollkommenheit hergestellt werden, bestehen aus einer Stahlsorte, an die in bezug auf Polierfähigkeit sowie Haltbarkeit nach dem Härten und Tempern die größten Anforderungen gestellt werden, wenn die Genauigkeit von 10^{-6} der Länge erreicht oder, wie es vielfach geschehen, noch übertroffen werden soll. Diese Angabe gilt bis zu Stücken von 10 mm herab, kleinere Dicken sind nicht viel genauer als 0,1 μ. Die Meßklötze werden in Sätzen zusammengestellt; z. B. enthält eine solche Reihe die Stücke: 0,5, 1, 1,001, 1,002 ... 1,009; 1,10, 1,11 ... 1,49, 1,5; 2, 2,5, 3 ... 24,5, 50, 75, 100 mm.

Nach dem Vorschlag des „Bureau of Standards" stellt man Endmaße auch aus Stellit her, einer Legierung aus 60—75% Kobalt, 15—20% Chrom und 2,5—6% Wolfram, die sich im gegossenen Zustande durch große Homogenität, Härte und Polierfähigkeit auszeichnen soll und außerdem etwa dieselbe Ausdehnung wie Stahl besitzt, so daß die Maße in der Werkstatt verwendbar sind. Man will mit der Legierung die Veränderlichkeit vermeiden, die Stücke aus gehärtetem Stahl mit der Zeit erleiden. Sicher wird diese Absicht erreicht mit Endmaßen aus Bergkristall, die

fahren bestimmt und verglichen werden können, wie wir noch sehen werden, so sind solche Maße keiner Abnutzung und Veränderung unterworfen und dem Strichmaße überlegen.

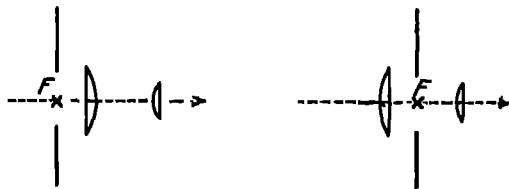
2. Vergleichung von Maßstäben.

Die Vergleichung verschiedener Maßstäbe und ihr Anschluß an Normale geschah ursprünglich mit dem Stangenzirkel, mit dem man auch Teilungen unmittelbar von einem Stabe auf einen andern übertrug. Hierunter litten natürlich die Striche, so daß man zur optischen Übertragung überging, wozu anfangs Visiere, später die Mikroskope mit Fadenmikrometer in Anwendung kamen. Das Bild des Teilstriches wird in der Brennebene des Objektivs abgebildet, wo es mit einem Faden oder Doppelfaden eingestellt wird, welcher senkrecht zur Sehlinie auf einem Schlitten mit der Mikrometerschraube verschiebbar ist.

Die Genauigkeit der Messung ist, abgesehen von der notwendigen Vergrößerung der Mikroskope, von der Feinheit und Genauigkeit ihrer Mikrometerschraube abhängig. Bei den feinsten Messungen, der Vergleichung der Meterstäbe, benutzt man eine 60—80fache Vergrößerung, bei welcher die gebräuchlichen Striche etwa $^1/_2$ mm breit erscheinen, und erreicht eine Einstellungsgenauigkeit von ungefähr $0{,}1\,\mu$. Um diese Größe mit Sicherheit verbürgen zu können, muß die Temperatur des betreffenden Metermaßes, bestehe er aus Platiniridium oder aus Stahl, auf 0,01° gemessen sein, was große Schwierigkeiten verursacht, wenn man den Maßstab nicht in ein Flüssigkeitsbad bringt.

Die Mikroskope versieht man zweckmäßig mit Ramsdenschen Okularen (Fig. 2a), weil man diese verschieben kann, ohne den Schraubenwert zu ändern, da das Fadenkreuz F vor beiden Linsen steht, während nach einer neuen Einstellung des Huygensschen Okulars (Fig. 2b) der Schraubenwert neu zu bestimmen ist.

Fig. 2a. Fig. 2b.
Ramsdensches, Huygenssches Okular

Zur Vergleichung von Maßstäben dient der Komparator, eine Vorrichtung, bei welcher einerseits zwei Mikroskope auf einen Träger verschoben und festgestellt, andererseits die auf solche Weise eingestellten Längen von dem einen Maßstab auf den andern übertragen werden können. Hierzu ist entweder die Beweglichkeit des Mikroskop-

Je nach der Richtung dieser Bewegung werden Transversal- und Longitudinalkomparatoren unterschieden. Bei der ersten Bauart erfolgt sie senkrecht zur Achse der Maßstäbe. In dem bevorzugten Falle, wo diese beweglich sind und der Mikroskophalter fest ist, liegen sie parallel nebeneinander auf einem Wagen und werden durch dessen Verschiebung nacheinander in das Gesichtsfeld der Mikroskope gebracht. Besondere Einrichtungen sind vorgesehen, womit die Mikroskope zu einander parallel und senkrecht zu den Teilungen gerichtet und die Unveränderlichkeit ihrer Lage geprüft werden kann.

Für die feinsten Messungen, den Anschluß der Kopien an das Urmeter oder der Normalmaßstäbe an die Kopien, wird auf eine größere Verschiebbarkeit der Mikroskope verzichtet; solche Apparate, wie z. B. der von KÖSTERS[2]) beschriebene, eignen sich nur zur Vergleichung von Meterstäben.

Zur Messung beliebiger Längen und namentlich zur Prüfung ausgedehnter Teilungen benutzt man den Longitudinalkomparator, bei welchem die Maßstäbe nicht senkrecht, sondern parallel zu ihrer Achse verschoben werden. Die beiden Mikroskope M_1 und M_2 sind nicht gleichzeitig auf denselben Maßstab gerichtet, sondern auf verschiedene, welche entweder nebeneinander (Fig. 3a) oder hintereinander (Fig. 3b) liegen können. Im ersten Falle genügt ein Mikroskop, wenn die Maßstäbe so dicht aneinander zu rücken sind, daß die Teilungen beider ins Gesichtsfeld fallen oder wenn die Maßstäbe, wie es bei durchsichtigen möglich ist, aufeinander liegen, so daß ihre Teilungen zusammenfallen.

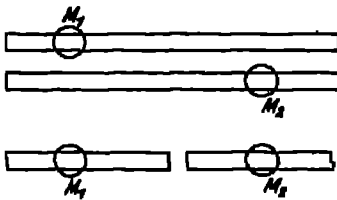



Fig. 3 a. Fig. 3 b.
Schema des Longitudinal-Komparators

Im allgemeinen gewährt der Longitudinalkomparator eine geringere Genauigkeit als das Transversalgerät, selbst wenn die beiden Bauarten mit festem Mikroskopträger und beweglichem Lager der Maßstäbe verglichen werden. Meistens besitzt aber der Longitudinalkomparator die umgekehrte Einrichtung, wobei oft der Mikroskopträger durch eine genau einstellbare Schraube bewegt wird und gegen einen andern mit Reißerwerk auszutauschen ist, so daß sich der Apparat auch als Teilmaschine benutzen läßt.

Für Maßstäbe mit durchgehender Teilung genügt es nicht, ihre Länge im ganzen zu messen, sondern die Teilung ist noch bis auf die einzelnen Intervalle oder wenigstens kleinere Gruppen davon zu prüfen. Man

gewinnt hierbei sehr an Genauigkeit, wenn die beiden Teilungen nicht nur in einer Zuordnung, sondern in mehreren verglichen werden. Gute Übersicht bietet für diesen Zweck das Verfahren des Durchschiebens[3]), nach welchen zuerst das letzte rechte Intervall des einen Stabes mit dem letzten linken des anderen verglichen wird, darauf eine Verschiebung um ein Intervall nach jeder Messung erfolgt, bis zuletzt das letzte linke Intervall des ersten an dem letzten rechten des zweiten Stabes gemessen wird.

Als Beispiel mögen 2 Stäbe A und B dienen, die jeder in 5 Intervalle geteilt in dieser Weise untersucht werden. In dem folgenden Schema, das die Messungen enthält, bedeuten die Zahlen in μ die Unterschiede zweier Intervalle, die verschiedenen Maßstäben angehören und am Kopfe einer Horizontalen und einer vertikalen Reihe angegeben werden, so daß z. B. zu lesen ist:

$$(2,3)_A = (3,4)_B + 1\,\mu.$$

B \ A	(0,1)	(1,2)	(2,3)	(3,4)	(4,5)	$-\Sigma$	$\frac{1}{5}\Sigma$	$\frac{1}{5}\Sigma - 2{,}1$
(0,1)	− 3	− 4	− 6	− 2	− 4	+ 19	+ 3,8	+ 1,7
(1,2)	+ 1	+ 1	− 1	− 8	+ 3	+ 4	+ 0,8	− 1,3
(2,3)	+ 1	− 3	+ 4	− 3	+ 2	− 1	− 0,2	− 1,9
(3,4)	− 2	− 2	+ 1	− 5	− 5	+ 13	+ 2,6	+ 0,5
(4,5)	− 4	− 1	− 2	− 7	− 4	+ 18	+ 3,6	+ 1,5
Σ	− 7	− 9	− 4	− 25	− 8		+ 10,6	
$\frac{1}{5}\Sigma$	− 1,4	− 1,8	− 0,8	− 5,0	− 1,6	− 10,6		
$\frac{1}{5}\Sigma + 2{,}1$	+ 0,7	+ 0,3	+ 1,3	− 2,9	+ 0,5			

Durch Addition aller Werte der Kolonne $(1,2)_A$ erhält man $5\,(1,2)_A = B - 9\,\mu$ und $(1,2)_A = \frac{1}{5}B - 1{,}8\,\mu$.

Dieselbe Rechnung, auf die übrigen Kolonnen angewandt, liefert nach der Addition: $\Sigma\,[n, (n+1)] = A = B - 10{,}6\,\mu$ und $\frac{1}{5}B = \frac{1}{5}A + 2{,}1\,\mu$, woraus folgt $(1,2)_A = \frac{1}{5}A + 0{,}3\,\mu$, d. h. das Intervall $(1,2)_A$ ist um $0{,}3\,\mu$ größer als das Mittel aus allen Intervallen des Stabes A. Nimmt man dieses als richtig an und addiert die Zahlen der untersten Reihe, so erhält man die Korrektionen der einzelnen Striche A:

Strich	0	1	2	3	4	5
Korrektion A	0,0	+ 0,7	+ 1,0	+ 2,3	− 0,6	− 0,1 μ.

Dasselbe Verfahren auf die horizontalen Reihen angewandt, wobei die Zeichen umzukehren sind, liefert als Korrektion der Striche B

Korrektion B 0,0 + 1,7 + 0,4 − 1,5 − 1,0 + 0,5 μ.

Zum Schluß sind die Ergebnisse um eine Stelle zu kürzen.

In derselben Weise wie Maßstäbe werden auch Schrauben, z. B. die der Okularmikrometer untersucht[4]). Zunächst vergleicht man die ganzen Schraubengänge mit der bekannten Teilung eines Maßstabes, wodurch die fortschreitenden Fehler der Schraube gefunden werden. Davon sind zu unterscheiden die periodischen, die sich in jedem Gang wiederholen. Sie werden durch Ausmessen einer engeren Teilung bestimmt, wobei die einzelnen Umdrehungen in eine Reihe von gleichen Intervallen zerlegt werden. Man pflegt die periodischen Fehler in einer nach dem Sinus und Kosinus des Winkels fortschreitenden Reihe darzustellen. In beiden Fällen ist bei der Messung der tote Gang der Schraube zu vermeiden, indem sie immer in demselben Sinne gedreht wird.

Die Komparatoren dienen nicht allein zur Vergleichung der Strichmaßstäbe untereinander, sondern auch zum Anschluß der Endmaßstäbe an die Strichteilungen. Da der Abstand der Mitten der Endflächen für die Länge des Endmaßes gültig ist, so kann man nicht etwa auf die Kanten einstellen, selbst wenn diese schärfer ausgebildet wären als es in der Regel der Fall ist. Es wird in der Weise verfahren, daß man an das Endmaß Stücke, sog. Anschiebezylinder, anlegt, die ihrerseits mit einem Strich versehen sind und nun den Abstand dieser Striche mißt, einmal wenn das Endmaß zwischen den Anschiebezylindern liegt, sodann wenn es entfernt und die Zylinder zur Berührung gebracht werden. Der Unterschied der gemessenen Abstände ergibt die Länge des Endmaßes. Voraussetzung dabei ist, daß die Berührung stets unter bestimmtem Druck stattfindet, die elastische Deformation also nicht wechselt und die Achsen von Maßstab und Anschiebestücken zusammenfallen.

3. Auswertung des Meters in Wellenlängen des Lichts.

Der Wunsch, statt des künstlichen Urmeters aus Platiniridium, über dessen Unveränderlichkeit stets eine gewisse Unsicherheit bestehen bleibt, ein natürliches konstantes Maß zu besitzen, hat dazu geführt, das Meter mit der Wellenlänge des Lichts zu vergleichen. Eine solche Messung ist zweimal im Internationalen Bureau ausgeführt worden und hat beide Male dasselbe Ergebnis gehabt. Zu diesem Zweck wurden für Bruchteile des Meters Zwischenmaße (étalons) hergestellt, die kürzesten davon unmittelbar in Wellenlängen ausgewertet und dann ebenfalls auf optischem Wege

[4]) M. Thiesen, K. Scheel und L. Sell. Wissensch. Abhand. der P.-T.-Reichs-

zu dem ganzen Meter zusammengesetzt. Als solche Zwischenmaße dienten Luftschichten, die durch versilberte Glasplatten abgegrenzt wurden, also Endmaße darstellen. Als Lichtquelle benutzte man die Quecksilberbogenlampe mit einigen Hundertstel Gramm Kadmium, die besonders drei Linien, eine rote, eine grüne und eine blaue von großer Schärfe und Einfachheit aussendet.

Fig. 4. Michelsonsches Zwischenmaß.

Die Form der Zwischenmaße, die bei der ersten Vergleichung von MICHELSON[6]) angewandt wurden, zeigt Fig. 4. Die Luftplatte wird begrenzt durch die beiden übereinander stehenden, auf der Vorderseite versilberten Glasplatten A, A', die auf einem Bronzekörper B mittels verstellbarer Anschläge und Druckfedern genau parallel ausgerichtet werden; die feine Justierung bewirkt ein sanfter Druck auf die Federn. H ist eine Handhabe; ein Querarm des längsten Zwischenmaßes trägt einen Strich, der zur Ver-

Fig. 5. Auswertung des Meters in Lichtwellen.

gleichung mit dem Urmeter dient. Der Bronzeträger B ruht mit drei Fußschrauben mittels Loch, Rinne und Ebene auf einem Schlitten und läßt sich durch empfindliche Getriebe justieren. Die Länge der Zwischenmaße beträgt $0{,}039 = 2^{-8} \cdot 10,\ 2^{-7} \cdot 10 \ldots 10$ cm, jedes also doppelt so lang als das vorhergehende.

Fig. 5 stellt schematisch die Versuchsanordnung dar. Das Licht der Quelle S wird durch eine Linse parallel gerichtet und fällt auf die schwach versilberte Vorderseite der Planparallelplatte A. Hier zerfällt es in zwei Büschel von gleicher Helligkeit: das eine durchsetzt die Platte A, gelangt

[6]) A. A. MICHELSON, Travaux et Mémoires du Bureau international XI, 1895

auf den Spiegel B und wird von dort nach R reflektiert, wonach es auf demselben Wege zurückkehrt und nach Reflexion an A das Beobachtungsfernrohr T trifft. Das andere Büschel wird nach der Spiegelung an A auf die beiden zu vergleichenden Zwischenmaße M_1 und M_2 geworfen, hier reflektiert erreicht es nach dem Durchgang durch A ebenfalls das Fernrohr T. In den Gang ist noch die Glasplatte C eingeschaltet, die der Platte A vollkommen gleicht, so daß beide Büschel gleiche Wege im Glase zurücklegen. Die Bildebene des Spiegels R in bezug auf die Silberschicht A bezeichnet MICHELSON als Referenzebene; sie bildet die eine Grenzschicht der Luftplatte, in der die Interferenzen beobachtet werden, die andere stellen die versilberten Flächen der Zwischenmaße dar. Durch Bewegung des Spiegels R wird die Referenzebene parallel zu sich verschoben entsprechend der Länge der Zwischenmaße Durch Drehung des Kompensators C werden die optischen Längen beider Büschel abgeglichen.

Mit dem auf unendlich eingestellten Fernrohr beobachtet man im homogenen Licht als Kurven gleicher Neigung kreisförmige Haidingersche Ringe, die konzentrisch um die senkrecht dazu gerichtete Visierlinie verlaufen. Wird der Abstand der spiegelnden Flächen kleiner, so wandern die Ringe nach dem Mittelpunkt, in dem sie verschwinden, und zwar jedesmal einer, wenn der Gangunterschied um eine ganze, der Abstand um eine halbe Wellenlänge abnimmt. Durch Zählung der im Mittelpunkt verschwindenden Ringe läßt sich also die Verschiebung der Spiegel messen. Je näher sie aneinander liegen, um so größer ist der Durchmesser der Ringe; sie verschwinden bei dem Abstande Null.

Die Länge des kleinsten Zwischenmaßes von etwa 0,39 mm wird auf diese Weise unmittelbar in Wellenlängen abgezählt, indem die Referenzebene nacheinander mit beiden Grenzflächen zur Deckung gebracht wird. Diese sind, um die Berührung zu erkennen, zu der Referenzebene schwach geneigt, so daß bei kleinem Abstande der Flächen Fransen gleicher Dicke auftreten, die zur Beobachtung benutzt werden.

Die Länge eines Zwischenmaßes wird im allgemeinen, in der Ordnungszahl ν ausgedrückt, eine gebrochene Zahl sein. Bestimmt man nun die Überschüsse über die ganze Zahl in einer Reihe von Farben und ist die Länge l des Maßes annähernd bekannt, so läßt sich die genaue Länge aus den Überschüssen ε_1, $\varepsilon_2 \ldots$ genauer angeben. Offenbar ist $2\,l = (\nu_1 + \varepsilon_1)\,\lambda_1 = (\nu_2 +_2)\,\lambda_2 = (\nu_3 + \varepsilon_3)\,\lambda_3 = \ldots$

Nun waren z. B. für 4 Wellenlängen die in der Tabelle angegebenen Überschüsse ε beobachtet. Gleichzeitig waren für rotes Licht 1212 halbe Wellenlängen gezählt, so daß im ganzen 1212,35 halbe Wellenlängen erhalten waren. Hieraus lassen sich die Zahlen für die übrigen

übereinstimmen, nicht mit 1211 oder 1213 oder mit irgendeinem andern benachbarten Wert.

	λ (μ)	ε beob	1	2	3
rot	0,64385	0,35	1212,35	1211,35	1213,35
grün	0,50858	0,79	1534,75	1533,48	1536,02
blau	0,48000	0,17	1626,29	1624,95	1627,63
violett	0,46780	0,53	1668,38	1667,01	1669,76

Die übrigen Zwischenmaße wurden alle zu je zwei miteinander verglichen; sie standen hierbei nebeneinander, und das kürzere wurde längs seiner Achse um seine Länge verschoben, wobei vorher und nachher das Zusammenfallen der Grenzflächen durch die Verschiebung der Referenzebene beobachtet wurde (Fig. 6). Für die Verdoppelung des Zwischenmaßes von 10 cm Länge, die etwa 400 000 halbe Wellenlängen beträgt, war die Deutlichkeit des Interferenzbildes nicht mehr ausreichend. Der Strich, der sich auf dem Querarm dieses Maßes befand, lag neben dem Endstrich des zu vergleichenden Metermaßes L auf dem Komparator, so daß beide zugleich im Mikroskop zu sehen waren. Nun wurde das Maß zehnmal um seine eigene Länge mittels der Referenzebene verschoben und in der letzten Stellung sein Strich mit dem andern Endstrich des Meterstabes im Mikroskop beobachtet.

Fig. 6. Stellung der Zwischenmaße.

Bei der Temperatur von 14,93° und normalem Luftdruck ergab sich:

$$
\begin{aligned}
1\,\text{m} &= 1\,553\,163{,}5\ \lambda_{\text{rot}} \\
&= 1\,966\,249{,}7\ \lambda_{\text{grün}} \\
&= 2\,083\,372{,}1\ \lambda_{\text{blau}}
\end{aligned}
\qquad
\begin{aligned}
\lambda_{\text{rot}} &= 0{,}643\,847\,22\ \mu \\
\lambda_{\text{grün}} &= 0{,}508\,582\,40 \\
\lambda_{\text{blau}} &= 0{,}479\,991\,07 \\
\lambda_{\text{violett}} &= 0{,}467\,812\,2
\end{aligned}
$$

BENOÎT, FABRY und PEROT[6]) haben die Auswertung des Meters in Wellenlängen des Kadmiumlichts wiederholt. Ihre Zwischenmaße hatten die Länge von 1,25, 6,25, 12,5, 25, 50 und 100 cm und waren ebenfalls Luftplatten, die von durchlässig versilberten Glasplatten begrenzt waren. Diese waren mittels Anschlägen und Schrauben an Invarkörper von U-förmigem Querschnitt (Fig. 7) gesetzt. Diese Legierung

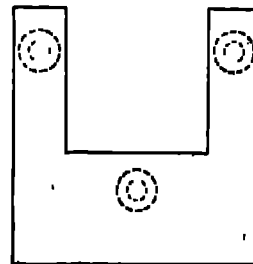



Fig. 7. Zwischenmaß von BENOÎT, FABRY u. PEROT.

gewährte den Vorteil, daß Temperaturschwankungen keinen Einfl
hatten, da die Verminderung der optischen Länge der Luftplatte infol
von Temperaturerhöhung durch die Ausdehnung des Invarringes au
geglichen wurde. Als Kompensator diente ein Keil, der aus zwei ei
seitig versilberten Glasplatten von 20 × 3 × 1,5 cm bestand; die ei
Silberschicht trug eine Teilung, welche in Wellenlängen einer en
sprechend dicken Luftschicht ausgewertet war.

Das Maß von 100 cm Länge war ein Invarstab von U-Querschni
an die Enden waren die durchlässig versilberten Glasplatten angedrück
auf denen dicht neben der Silberschicht Striche gezogen waren, die
Länge von 1 m begrenzten und mit denen des Urmeters verglichen wurd
War der Abstand zwischen den Silberschichten der Glasplatten dur
Interferenzen gemessen, so war noch der Abstand dieser Schichten v
den Strichen zu bestimmen. Zu diesem Zweck stellte man aus den Gl
platten des Invarstabes zwei Maße von etwa 1 und 2 cm Länge her, u
zwar war der Strichabstand bei dem ersten Maße genau zweimal so gr
wie bei dem zweiten, so daß der zu ermittelnde Unterschied gleich
Länge der Luftplatte des zweiten Maßes vermindert um die doppe
Länge des ersten Maßes war.

Die Länge des 6,25-cm-Maßes wird nach dem MICHELSONschen Verfahr
mit Interferenzen gleicher Neigung bestimmt. Darauf wird mit dies
Maß das folgende usw. unter Beobachtung von BREWSTERschen Int
ferenzen verglichen. Die Maße stehen dabei alle hintereinander und w
den durch wegklappbare Spiegel zu je zwei mit parallelem weißen Li
beleuchtet. Gleichzeitig ist stets ein keilförmiger Kompensator in
Sehlinie eingeschaltet. Wären die zu vergleichenden Maße gleich la
so würden für jede der interferierenden Welle nur zwei Reflexion
notwendig sein; steigt das Längenverhältnis wie im vorliegenden Fa
auf 1 : 2, so interferiert der an dem einen Maß viermal reflektierte Str
mit dem am andern Maß zweimal reflektierten. In der Richtung,
welcher die Weglänge der einen Komponente genau gleich der doppelt
der andern ist, wobei der Kompensator ausgleichend mitwirkt, sie
man den weißen Streifen, zu beiden Seiten gefärbte Streifen.

Die fünf notwendigen Vergleichungen der Zwischenmaße lass
sich mit der fertigen Einrichtung in etwa 10 Minuten ausführen.
Ergebnis folgte aus allen Messungen: 1 m = 1 553 164,13 λ_{rot}; λ_{rot}
0,643 846 96 μ, bezogen auf 15° und 760 mm Quecksilber. Wird der MICHE
SONsche Wert (S. 19) auf dieselbe Temperatur zurückgeführt, so ergibt si
λ_{rot} = 0,643 847 27 μ. Der Unterschied zwischen beiden Angaben b
trägt also etwa $^1/_2$ Millionstel, wobei zu berücksichtigen ist, daß der letz

der Luftfeuchtigkeit, die MICHELSON nicht beobachtete, ist freilich gering und würde den Wert bei dem Übergang von trockener zu gesättigter Luft nur um 0,000 000 7 μ ändern, so daß der MICHELSONsche Wert, wenn er bei 60% Feuchtigkeit gemessen wäre, dem zweiten Ergebnis gleichkäme, dessen Genauigkeit von den Beobachtern jedoch etwa fünfmal höher geschätzt wird.

Die Auswertungen des Meters in Wellenlängen, die unmittelbar an kleineren Endmaßen — denn als solche kann man die Luftplatten der Zwischenmaße betrachten — ausgeführt wurden, legen den Gedanken nahe, die Meßklötze ebenfalls auf optischem Wege untereinander zu vergleichen und sie auch auf diese Art absolut zu messen. Den Interferenzapparat, den KÖSTERS[1]) hierzu benutzt, stellt Fig. 8a schematisch dar. Die beiden zu vergleichenden Endmaße N und S sind nebeneinander auf eine ebene Quarzplatte aufgesprengt, die auf einem verstellbaren Tisch liegt. Das Licht einer Helium enthaltenden Geißlerschen Röhre L fällt nach Durchgang durch die Linse O parallel auf einen Glaskörper, der aus zwei Prismen zusammengesetzt ist, wobei die versilberte Trennfläche als halbdurchlässig wirkt, so daß der Strahl an A B total reflektiert, auf die Endmaße fällt, von dort zurückgeworfen in das untere Prisma zurückkehrt und nach Reflexion an A C in das Beobachtungsfernrohr F geworfen wird, dessen Blendenöffnung mit einem Gaußschen Okular so justiert wird, daß sie mit dem Spiegelbild an der unteren Prismafläche zusammenfällt. Beobachtet werden die zwischen der Oberfläche der Endmaße und der unteren Prismenfläche entstehenden Interferenzstreifen gleicher Dicke, die in dem Falle, wo die Endmaße nicht gleich lang und keine parallele Oberflächen aufweisen, die in Fig. 8b dargestellte Ansicht gewähren. Zur Kennzeichnung der Ordnungszahl der Streifen schwächt man zweckmäßig das gelbe Licht des Heliums durch ein Methylviolettfilter: es kommen alsdann hauptsächlich die rote (0,6678 μ), die grüne (0,5016 μ), die blaue (0,4713 μ) und die violette (0,4471 μ) zur Wirkung, die sehr lebhafte Mischfarben liefern, so daß man leicht einen charakteristischen Streifen für die Beobachtung aussuchen

Fig. 8a. Auswertung von Meßklötzen.

kann. In Fig. 8 b falle er in die Mitte des Normalmaßes N, auf dem Maße S ist er dann im allgemeinen verdreht und um eine Strecke verschoben, die in Streifenbreiten durch den verschiebbaren Faden des Fernrohrs im homogenen Licht, z. B. im Grün durch Einsatz eines grünen Filters, gemessen wird. Setzt man die Maße um und mißt den Unterschied in derselben Weise, so liefert das Mittel beider Beobachtungen den Unterschied der Mitten von N und S. Das Vorzeichen läßt sich dadurch feststellen, daß man auf den Schlitten drückt, auf welchem das Prisma längs einer Säule gleitet, damit es in beliebigem Abstand über dem Tische festgestellt werden kann. Die Streifen wandern dann in derselben Richtung, und dasjenige Maß ist das längere, auf dem ein bestimmter Streifen in der Wanderungsrichtung vorangeht.

N S

Fig. 8 b.

Zur absoluten Messung setzt man das auf die Quarzplatte gesprengte Endmaß unter das Prisma, dessen untere Fläche bis auf etwa 1 mm herangeführt wird. Man sieht hier im allgemeinen bei passender Neigung der Flächen zwei Streifensysteme und erkennt ohne weiteres den Bruchteil der Streifenbreite, um welchen die beiden Systeme gegeneinander verschoben sind. Die ganze Anzahl der Streifen, die hier nicht mehr abgezählt werden kann, ergibt sich aus der Messung der Bruchteile in den Farben der sechs Linien. Da deren Wellenlängen genau bekannt sind, ebenso die angenäherte Länge (auf etwa $\pm 5\,\mu$) des Endmaßes, so verwandelt man diese Länge in halbe Wellenlängen und rechnet nun mit den Bruchteilen der halben Wellenlänge, für welche sich bei jeder Länge eine bestimmte Kombination der sechs Farben ergibt. Ist z. B. ein Endmaß von 20 mm zu messen, so ist seine Länge bei 20° und dem Luftdruck von 760 mm Quecksilber gleich $20\,000\,\mu = 20\,000 : 0{,}333\,9089 = 59\,896{,}57$ halben roten Wellenlängen. Für die übrigen Farben erhält man ebenfalls eine ganze Zahl und einen Bruch, und zwar

für Rot	Gelb	Grün	Blaugrün	Blau	Violett
0,57	0,56	0,56	0,58	0,67	0,41.

Stimmt der Sollwert des Endmaßes, so müssen diese Bruchteile beobachtet werden, andernfalls ergibt die Differenz: gemessene Bruchteile — Sollbruchteile die Bruchteile des Unterschieds: Istlänge — Sollänge. Das Ergebnis wird mit einem Schieber auf einem Rechenstab eingestellt, welcher die Zehntel Wellenlängen aller sechs Farben neben einer Teilung in $0{,}1\,\mu$ trägt. Beobachtet man bei t° und dem Barometerstande p, so ist $\lambda_{\text{beob.}}/\lambda_{\text{nor.}} = 1 + 278{,}54 \cdot 10^{-6} - \frac{0{,}386\,34}{1 + 0{,}003\,67\,t}\, p \cdot 10^{-6}$, die Wellen-

760 mm Quecksilber) bei der Temperaturerhöhung von 1° um $0,95 \cdot 10^{-6}$ länger und bei der Druckerhöhung von 1 mm um $0,36 \cdot 10^{-6}$ kürzer. Mit der Temperaturkorrektion kann man noch die Korrektion für die Ausdehnung des Stahls ($11,5 \cdot 10^{-6}$/Grad) vereinigen, so daß die gesamte Temperaturkorrektion $10,55 \cdot 10^{-6}$ beträgt. Bei Verwendung der Heliumlinien lassen sich in dieser Weise Endmaße bis 25 mm Länge bestimmen.

Die Endmaße aus Bergkristall werden nach einem Verfahren ausgemessen, welches sich an das MICHELSONsche Interferometer anlehnt [PÉRARD [8])]. Das Maß E wird vor dem Spiegel M aufgestellt, und es werden die Interferenzen zwischen dem Bilde R′ der Referenzebene R und dem Spiegel ohne und mit dazwischenstehendem Maß beobachtet. Alsdann blendet man durch die Schirme C_1 und C_2 sowohl R als M ab und untersucht die Interferenzen zwischen der vorderen und hinteren Endfläche des Quarzmaßes (Fig. 9).

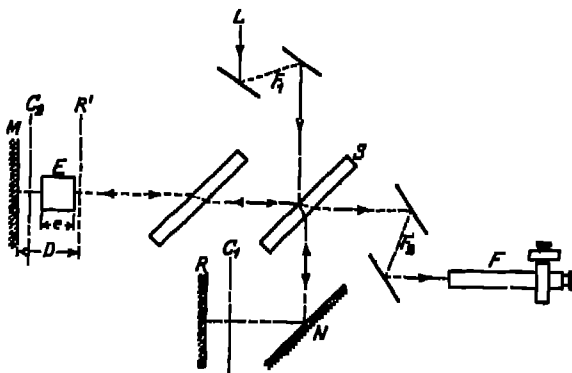



Fig. 9. Auswertung von Quarzmaßen.

Ist D der Abstand des Spiegels M von der Bildebene R′, e die Dicke und n der Brechungsindex des Quarzes, so ergibt sich: $p\lambda = 2D$; $p'\lambda = 2(D - e) + 2ne$; $p''\lambda = 2ne$, wo p, p′, p″ die Zahlen der beobachteten Wellenlängen bezeichnen. Daraus folgt $2e = (p + p'' - p')\lambda$. Auch hier sind nur die Bruchteile von p, p′ und p″ zu messen, aus denen sich mit einem Näherungswert von e die ganze Zahl für den Klammerausdruck ergibt. Gleichzeitig erhält man einen Wert für n. Nach der Methode wurden Normale bis 30 mm Länge mit einer Genauigkeit von 0,01 μ gemessen.

4. Längenmeßgeräte zweiter Ordnung.

Wie die Komparatoren zur Vergleichung der Strichmaßstäbe dienen, so gibt es zur Messung von Endmaßen und Gegenständen, welche keine Teilung tragen, was im Werkstattbetriebe z. B. die Regel bildet, eine Reihe von Geräten, unter denen die Schublehre am gebräuchlichsten ist. Der zu messende Körper wird hier zwischen zwei Backen geklemmt, von denen die eine auf einer Teilung verschiebbar ist; ihre Stellung kann

[8]) [illegible] Feinmechanik und Technik 1925. 235.

mittels eines Nonius (Vernier) auf einen Bruchteil des Strichzwischenraumes genau abgelesen werden. Bezeichnet i_m die Entfernung der Striche des Maßstabes, i_n diejenige der Noniusteilung, die die Länge l besitze, so ist allgemein $l = a i_n = (a \pm 1) i_m$. Die Größe a pflegt man gleich 10 oder 20 anzunehmen, so daß sich mit dem Nonius $^1/_{10}$ (Fig. 10) oder $^1/_{20}$ des Teilungsintervalls ablesen läßt. Größere Werte von a erfordern eine starke Vergrößerung durch eine Lupe und finden wenig Anwendung, weil man auch bei $^1/_{20}$-Nonius noch kleinere Intervalle danach schätzen kann, ob einer der Noniusstriche mit einem Strich der Hauptteilung genau zusammenfällt oder nicht. Zu beachten bleibt als erstes Erfordernis für eine genaue Messung mit dem Nonius, daß seine Teilung ebenso fehlerfrei sein muß wie die des Maßstabes, was der Beobachter leicht übersieht.

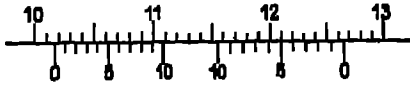



Fig. 10. Nonius.

Für die Messung kleiner Längen bedient man sich der Fühlhebel, deren Genauigkeit darauf beruht, daß die Bewegung der scharnierartig verbundenen Backen durch lange Hebelarme vergrößert auf der Teilung angezeigt wird. Vielseitiger ist noch die Verwendung der Meßschraube, die einmal in der Form von Dickenmesser oder Schraubenlehre weite Verbreitung gefunden hat, sodann auch die Grundlage für die mannigfachen Formen der Meßmaschinen bildet, die in der Technik zur genauen Messung größerer Längen benutzt werden. Die bewegliche Klemmbacke des Dickenmessers (Fig. 11) wird durch eine Schraube verschoben, durch deren Umdrehungen zugleich die Bewegung gemessen wird; die ganze Zahl und der Bruchteil der Drehung wird an einem Index auf dem Bugel abgelesen. Für die Schrauben werden meist Gewinde von 1 oder $^1/_2$ mm Steigung benutzt, die Trommel wird in 100 Teile geteilt. Mit bekannten Endmaßen bestimmt man die periodischen und fortschreitenden Fehler der Schraube, wobei sie stets gleich stark anzuziehen ist. Für diesen Zweck sind die Mikrometer mit einer Gefühlsschraube versehen, welche einen konstanten Meßdruck gewährleistet. Vor dem Gebrauch ist die Ebenheit der Meßbacken zu prüfen.

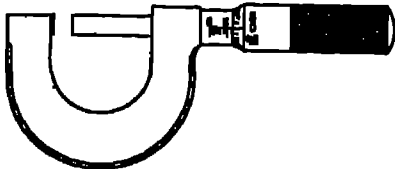



Fig. 11. Dickenmesser.

Ein Schraubenmikrometer besonderer Art bildet das Sphärometer, das vornehmlich zur Bestimmung der Krümmungsradien von Kugelflächen (z B. Linsen) dient. Die Spitzen eines Dreifußes (Fig. 12) bilden ein gleichseitiges Dreieck und werden auf die zu messende Kugelfläche

gesetzt. Die Pfeilhöhe des Kugelabschnittes wird alsdann mit der Schraube gemessen. Der Nullpunkt ergibt sich dadurch, daß man das Instrument auf eine ebene Platte stellt und die Einstellung ermittelt, bei welcher es zu wackeln beginnt, was eine Genauigkeit von etwa 5 μ zuläßt. Aus der Pfeilhöhe h folgt für den Radius r, wenn s die Seitenlänge des Fußdreiecks bezeichnet: $r = \frac{1}{2}(h^2 + \frac{1}{3}s^2)/h$.

Den drei Fußspitzen ist eine kreisförmige Stahlschneide vorzuziehen, die sich auf der Drehbank genau herstellen läßt und gegen Veränderungen unempfindlicher ist. Es gilt dann die Formel $r = \frac{1}{2}\left(\frac{\varrho^2}{h} + h\right)$, wo ϱ den Radius der Schneide bedeutet.

Statt der Meßschraube hat ABBE weiter einen Maßstab eingeführt, dessen Verschiebung an einem Mikroskop mit Schraubenmikrometer abgelesen wird. Die zu messende Kugelfläche wird dann von oben auf die Schneide gelegt, sie wird von Säulen getragen, zwischen denen der Maßstab von unten durch den Ring geschoben wird[1]). Eine ähnliche Bauart weist der ABBEsche Dickenmesser auf.

Fig. 12. Sphärometer.

Mit dem Kathetometer (DULONG und PETIT 1817), das zu den gebräuchlichsten Instrumenten des Physikers gehört, werden senkrechte Längen gemessen. Es dient z. B. zur Bestimmung des Höhenunterschieds von Flüssigkeitsoberflächen, der mit horizontal gerichtetem Fernrohr auf einen senkrechten Maßstab übertragen wird. Die Ausführungsformen sind mannigfach. Jedoch lassen sich zwei Hauptformen unterscheiden, je nachdem zwei Fernrohre oder eins zur Anwendung kommt. Bei der ersten, die man auch als Vertikalkomparator bezeichnet, wird jedes der beiden Fernrohre, die drehbar an einer senkrechten Säule zu verschieben sind, auf eine Grenze der zu messenden Strecke eingestellt, worauf der gemeinschaftliche Träger so gedreht wird, daß die Sehlinien auf den außerhalb befindlichen Maßstab gerichtet sind und die Länge darauf mit Hilfe der Okularmikrometer gleichsam abgegriffen wird.

Die zweite Form, die geringere Genauigkeit liefert, weist nur ein Fernrohr auf, mit dem nacheinander beide Grenzen einzustellen sind. Die Säule, auf der es gleitet, bildet vielfach zugleich den Maßstab, der mit am Schlitten befestigtem Nonius oder Mikroskop abgelesen wird. Zur

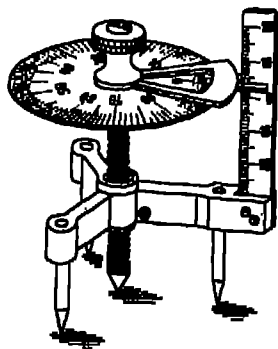
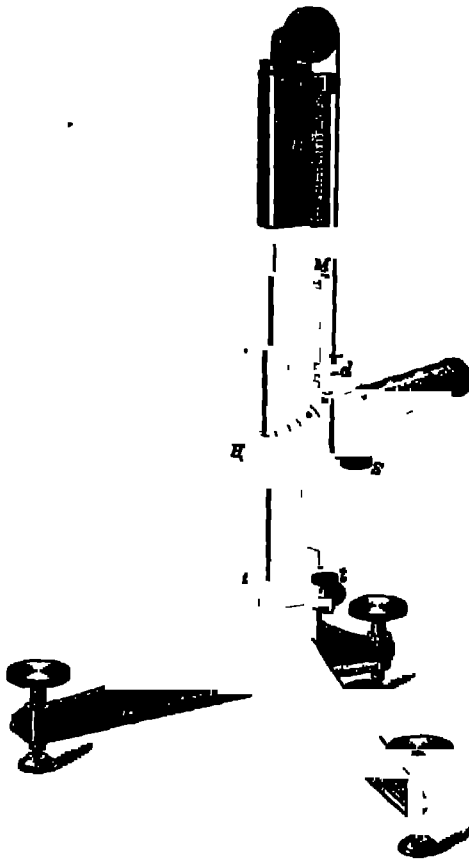



Fig. 13. Kathetometer.

Prüfung seiner horizontal Richtung trägt das Fernrol eine Libelle, die auch zur Au richtung der Säule benut werden kann.

Für die Genauigkeit d Messung ist es offenbar e forderlich, daß der Abstan der horizontalen Ebene, di durch den Skalenindex geh von derjenigen durch die Sel linie des Fernrohrs bei desse Verschiebung konstant bleib Dieser Bedingung genüg FUESS[10]) mit einer Bauar bei welcher der Index in di Sehlinie fällt. Er benutzt ein Skala M aus Mattglas, die da Fernrohr und seinen Schlitte durchdringt, so daß die Teilun in die Bildebene fällt. Si nimmt die eine Hälfte de Gesichtsfeldes ein, während i der andern der anvisiert Gegenstand auf den Index de Nonius einzustellen ist (Fig. 13)

Drittes Kapitel.

Masse.

Die Einheit der Masse ist das Gramm, der tausendste Teil des Kilo gramms aus Platiniridium, das im Internationalen Bureau zu Breteuil auf bewahrt wird. Als Teil der Einheit wird besonders noch das Milligramm benutzt, die Benennungen der übrigen Bruchteile spielen keine Rolle

1. Die gleicharmige Hebelwage[1]).

Zur Messung der Masse dient die Wage, und zwar hauptsächlich die gleicharmige Hebelwage, die sowohl dem Physiker als auch dem Che

[10]) R. FUESS, ZS. f. Instr 1886, 153.

[1]) W FELGENTRÄGER, Theorie, Konstruktion und Gebrauch der feinern Hebelwage. Teubner 1907

miker unentbehrlich ist. Der Hebel bildet den Balken der Wage, der sich um eine mittlere horizontale Achse dreht, außerdem noch an jedem Ende eine parallele Achse besitzt. Daran hängen die Schalen, von denen die eine die zu messende Masse, die andere bekannte Massen, Teile des Gewichtsatzes, aufnimmt. Man vergleicht die Massen durch die Wirkung, welche das Schwerefeld der Erde darauf ausübt.

In Fig. 14 mögen A O und B O die Hebelarme darstellen, die gegen die Horizontale H um den Winkel α geneigt seien. In den Endpunkten A und B wirke je das Gewicht M, wodurch sich die Ruhelage der Wage

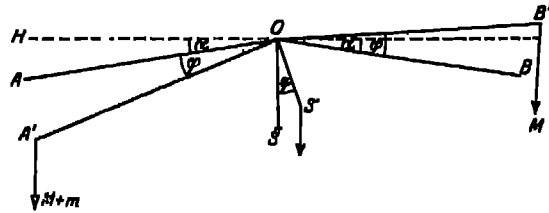



Fig. 14. Hebelwage.

nicht ändert. Wird links das Gewicht um m vermehrt, so drehe sich der Wagebalken, dessen Gewicht gleich M′ sei, um den Winkel φ, so daß A O nach A′O, B O nach B′O und der Schwerpunkt S nach S′ gelangt. Bezeichnet l die Länge des Hebelarms und s den Abstand O S des Schwerpunkts vom Drehpunkt O, so ist für das Gleichgewicht $l\,(M + m)\cos(\alpha + \varphi) =$

$$l\,M\cos(\varphi - \alpha) + M' s \sin\varphi \quad \text{oder} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{l\,m\cos\alpha}{l\,(2M + m)\sin\alpha + M's}.$$

$\operatorname{tg}\varphi$, wofür bei kleinen Ausschlägen auch der Bogen gesetzt werden kann, ist ein Maß für die Empfindlichkeit, die man auf das Übergewicht von 1 mg zu beziehen pflegt, wobei φ in Teilen einer Skale ausgedrückt wird, über welcher gewöhnlich ein mit dem Wagearm verbundener Zeiger spielt.

Wie die Formel zeigt, nimmt die Empfindlichkeit der Wage mit wachsender Belastung ab, wenn α positiv ist, die seitlichen Achsen also unter der Mittelachse liegen. Dieser Höhenunterschied kann zunehmen, wenn sich der Wagebalken infolge der Belastung durchbiegt, so daß die Empfindlichkeit noch schneller mit steigender Belastung abnimmt.

Die Bedingung $\alpha = o$, d. h. Endachsen und Mittelachse in einer Ebene, bewirkt, daß die Empfindlichkeit von der Belastung unabhängig ist. Das ist natürlich für eine feine Wage angenehm, und da man diese Forderung nur für eine bestimmte Belastung erfüllen kann, so wird ihr von dem Verfertiger der Wage gewöhnlich für eine mittlere Belastung genügt, so daß man bei steigender Belastung anfangs eine Steigerung der Empfindlichkeit und später eine Abnahme beobachtet. Für den idealen Fall, wo $\alpha = o$ ist, $\operatorname{tg}\varphi = \frac{l\,m}{M's}$, d. h. die Empfindlichkeit ist der Balkenlänge

direkt und dem Produkte aus dem Balkengewicht und dem Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt umgekehrt proportional.

Da das Gewicht eines Balkens bei gleicher Festigkeit schneller wächst als die Länge, so ist eine kurzarmige Wage bei gleicher Ausführung im allgemeinen vorzuziehen. Man gewinnt damit außerdem Zeit, da die Schwingungsdauer kleiner ist. Für die Verbreitung der kurzarmigen Wagen ist das Vorgehen der Firma BUNGE bahnbrechend gewesen (1867)

Stehen die Seitenachsen nicht genau parallel, sondern schief zur Mittelachse, so hängen Gleichgewicht und Empfindlichkeit von der Verteilung der Last auf der Schale ab, und zwar in stärkerem Maße bei den kurzarmigen als den langarmigen Instrumenten Man vermeidet diesen Übelstand dadurch, daß zwischen Seitenachse und Schale ein Kreuzgehänge (Fig. 15) eingeschaltet wird, entweder in Form zweiteiliger Schneiden oder Paaren von Spitzen Unnötig ist ein solches Zwischenglied, wenn die Seitenachsen durch Spitzen ersetzt werden, wie es bei Wagen, die für kleine Lasten bestimmt sind, zu geschehen pflegt, weil sich dann der Schwerpunkt der belasteten Schale immer senkrecht unter die Spitze stellt.

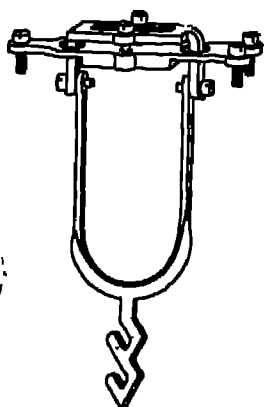



Fig. 15. Kreuzgehänge.

Die Wage ist vor Luftströmungen und ungleichmäßigen Temperatureinflüssen zu schützen. Denn um eine Genauigkeit von 10^{-8} in dem Wägungsergebnis zu erreichen, was nicht übermäßig scheint, da bei der Wägung von 1 kg eine Genauigkeit von 10^{-8} möglich ist, muß die Länge eines halben Balkens von 10 cm auf 0,1 μ konstant sein, was der Ausdehnung eines Messingbalkens bei einer Erwärmung von $^1/_{20}{}^\circ$ entspricht Das Instrument ist also nicht allein durch einen Luftkasten, sondern unter Umständen noch durch Schirme vor einseitiger Strahlung, auch von seiten des Beobachters, zu schützen

Die Empfindlichkeit der Wage nimmt im allgemeinen etwas mit wachsender Temperatur ab, weil sich der Schwerpunkt proportional dem Unterschied der Ausdehnungskoeffizienten von Balken und Schneiden verschiebt. Auch wird wohl die Verbindung zwischen beiden — die Schneide wird in den Balken fest eingekeilt — von der Temperatur beeinflußt[a]).

Der Balken, wozu verschiedene Legierungen, wie Phosphorbronze, Magnalium oder auch Aluminium, verwendet werden, besteht entweder aus

einem Stück mit Aussparungen oder aus einzelnen miteinander verschraubten Streben (Fig. 16 u 17), so daß er ein Gitterwerk darstellt, das gegen Durchbiegung unempfindlich ist Die Achsen, gebildet aus ebenen Pfannen und dreieckigen Schneiden, sind aus Achat oder Karneol geschliffen, die letzteren auch da wohl aus Stahl, wo das Rosten nicht zu befürchten ist. Die Mittelpfanne sitzt auf einer Stange, die durch einen Exzenter in der Mittelsäule der Wage auf- und abbewegt werden kann, so daß die Schneide nach der Wägung abzuheben ist. Der Balken legt sich dann auf ein festes Lager, auf dem sich auch die Seitenschneiden aufsetzen, die durch eine andere Vorrichtung ebenfalls von ihren Pfannen getrennt werden. Der Zeiger bewegt sich dicht oberhalb einer Millimeterteilung, die nötigenfalls mit einer Lupe oder einem Fernrohr beobachtet wird. Durch ein Reguliergewicht, das auf dem Zeiger oder einem andern Fortsatz des Balkens in senkrechter Richtung dazu verschoben wird, läßt sich der Schwerpunkt des Balkens verlegen und die Empfindlichkeit ändern. Ferner sind in wagerechter Richtung bewegliche Schräubchen vorgesehen, die kleine Unterschiede im Gewicht der Balkenhälften ausgleichen.

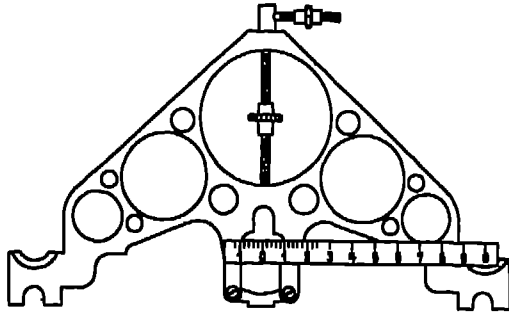



Fig 16. Wagebalken.

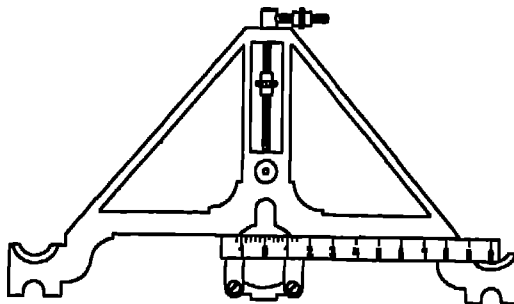



Fig. 17. Wagebalken.

Um an kleinen Gewichten zu sparen, die sich schnell abnutzen, besitzen weniger genaue Wagen, z. B. die für Analysen, ein Reiterlineal, das mit dem Balken verbunden ist. Ist die Strecke zwischen der Mittel- und einer Endachse in 100 Teile geteilt und verschiebt man ein Drahtgewicht von 10 mg, so kann man das Gewicht um 0,1 mg ändern. Dies geschieht durch eine einfache Vorrichtung, die bei geschlossenem Gehäuse betätigt wird.

Mit einem ähnlichen einfachen Mechanismus, wie er zur Verschiebung

auf den Balken setzen und dadurch die Empfindlichkeit ohne Änderung der Ruhelage um das Zehnfache ändern.

Empfindliche Wagen liest man mit Spiegel und Skale ab. Auch besitzen sie oft Einrichtungen, mit denen der Beobachter aus der Entfernung die Belastung ändern oder zwischen links und rechts vertauschen kann.

Für Massen bis 20 g, z. B für die Zwecke der Mikroanalyse, baut man besondere kleine Wagen, deren Empfindlichkeit etwa 0,01 mg beträgt. Sie sind gegen Temperaturschwankungen sehr empfindlich, so daß man den Balken innerhalb des Gehäuses noch mit einem zweiten Kasten aus Glas und Metall umgeben und auch außen noch Schirme gegen störende Strahlung anbringen muß.

Vielfach wurden für Mikrowagen elastische Gelenke vorgeschlagen, die W. WEBER (1841) in Gestalt von auf Biegung beanspruchten Blattfedern in den Wagenbau einführte. Das Torsionsgelenk, bei dem der Balken an einem gespannten Draht befestigt ist, der auf Torsion beansprucht wird, hat mehrfach Verwendung gefunden, seit NERNST (1903) statt des Drahtes einen Quarzfaden benutzte Der Ausschlag wird an einer Skale gemessen. SALVIONI (1905) klemmte bei seiner Mikrowage einen Quarzfaden an seinem einen Ende ein, das andere besitzt ein Häkchen, das die zu wägende Masse trägt. Die Biegung wird mit dem Okularmikrometer eines Mikroskopes abgelesen

2. Wägungsverfahren.

Die Reibung einer guten Wage ist so gering, daß man das Aufhören der Schwingungen nicht abwarten kann Man bestimmt deshalb die Ruhelage aus Umkehrpunkten Für die in geometrischer Reihe abnehmenden Schwingungsbogen kann man mit genugender Annäherung eine arithmetische Reihe setzen und erhält für drei aufeinanderfolgende Umkehrpunkte a_1, a_2, a_3 als Ruhelage $\alpha = \frac{1}{4}(a_1 + 2a_2 + a_3) = \frac{1}{2}\left\{\frac{1}{2}(a_1 + a_3) + a_2\right\}$. Um grobe Ablesungsfehler nachträglich zu erkennen, mag man auch vier Umkehrpunkte beobachten und erhält dann als Ruhelage $\alpha = \frac{1}{8}(a_1 + 3a_2 + 3a_3 + a_4)$. Noch mehr Ablesungen erhöhen die Genauigkeit nicht, da sie durch die Änderungen beschränkt wird, welche die Ruhelage bei dem Arretieren erleidet.

Das Gleichgewicht der Wage bei jeder Belastung durch Abgleichung der Gewichte auf denselben Skalenteil einzustellen, wäre mühsam und umständlich. Man bestimmt deshalb ein für allemal für eine gewisse Last die Änderung $\alpha_1 - \alpha_2 = s$ Skt, welche das Gleichgewicht durch Auflage eines kleinen Übergewichts von m mg auf die eine Schale erfährt, und rechnet dann mit der bekannten Empfindlichkeit $E = s/m$ die Ab-

Bei der Wägung werden verschiedene Wege eingeschlagen. Nach dem Tarierverfahren (BORDA) wird die zu wägende Masse M auf die eine Schale gelegt und auf die andere so viel von einer beliebigen Tara — am zweckmäßigsten Teile eines Gewichtsatzes —, daß die Wage ins Gleichgewicht kommt. Darauf wird die Masse M durch Normalgewichte ersetzt, bis die Wage wiederum einspielt. Diese stellen alsdann das Gewicht von M dar bis auf die kleinen, besonders zu bestimmenden Unterschiede in den Einstellungen. Ist diese zuerst α_1 und nach dem Ersatz der Tara durch das Normalgewicht G α_2, so erhält man: $M = G + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{E}$.

Bei dem Vertauschungsverfahren (GAUSS) legt man die zu wägende Masse M nacheinander auf die rechte und linke Schale und bringt die Wage jedesmal durch Auflegen von Normalgewichten auf die andere Seite zum Einspielen. Bedarf es dazu der Gewichte G_1 und G_2, wobei man die Einstellungen α_1 und α_2 erhält, so ist $M = \frac{1}{2}\left(G_1 + G_2 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{E}\right)$.

Beide Male geht die Ruhelage α_0 der unbelasteten Wage nicht in das Ergebnis ein. Von dieser geht man jedoch bei einem dritten Verfahren aus, das vielfach im Gebrauch, aber weniger genau ist. Nach Bestimmung der Ruhelage wird die zu wägende Masse auf die linke Schale gelegt, auf die rechte das Normalgewicht G. Ergeben sich dabei die Einstellungen α_0 und α, so ist: $M = G + \frac{\alpha - \alpha_0}{E}$. Hierbei wird vorausgesetzt, daß die Hebelarme L und R der Wage gleich sind.

Zur Prüfung dieser Eigenschaft macht man von dem Vertauschungsverfahren Gebrauch. Werden dabei zwei nahezu gleiche Gewichte G' und G'' miteinander verglichen und muß bei der Vertauschung rechts zu G' das Gewicht g' und zu G'' das Gewicht g'' hinzugefügt werden, wobei Zulagen links negativ zu rechnen sind, so ist nach dem Hebelgesetz: $(G' + g')\,R = G''\,L$, $(G'' + g'')\,R = G'\,L$ und $\frac{R^2}{L^2} = \frac{(G' + g')\,(G'' + g'')}{G'\,G''}$, oder unter Vernachlässigung kleiner Größen höherer Ordnung: $\frac{R}{L} = 1 + \frac{g' + g''}{2\,G'}$.

3. Gewichtsätze.

Platinmetall, aus denen das Urkilogramm und seine an die Länder verteilten Kopien hergestellt worden sind, werden bei den für den Gebrauch bestimmten Gewichtsätzen nur für Stücke unter 1 g verwendet. Doch nimmt man auch zu diesen kleinen Gewichten meist unedles Metall,

Messing, dessen Oberfläche vergoldet oder zweckmäßiger vernickelt wird. Zum Anfassen mit der Pinzette erhält die zylindrische Form einen Knopf, der bei den meisten Stücken eingeschraubt ist und eine kleine Höhlung verdeckt, die zur Aufnahme von Körperchen zur Abgleichung dient. Haltbarer sind natürlich Gewichte aus einem Stuck und für Normalsätze, die auch meistens ohne Knopf angefertigt werden, unentbehrlich. Die Bruchstücke des Gramms werden an einer aufgebogenen Ecke angefaßt und erhalten am besten verschiedene Form, damit ihr Betrag auch ohne Aufschrift kenntlich ist (Fig. 18). Die kleinsten Gewichte und die Reiter stellt man aus Aluminiumdraht her.

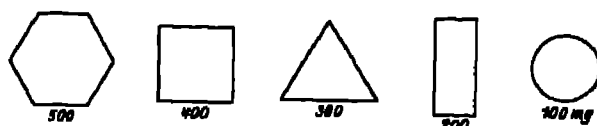



Fig. 18. Gewichtsatz.

Als Kontrollsätze benutzt man wohl Gewichte aus Bergkristall. Aber der Vorteil ihrer guten Haltbarkeit wird aufgewogen durch ihren großen Luftauftrieb und ihre elektrische Aufladung, die sich durch die beim Anfassen unvermeidliche Reibung bilden kann. Glas hat dieselben Nachteile und ist auch gegen die Feuchtigkeit der Luft nicht indifferent.

Die gewöhnliche Aufbewahrung der Gewichtsätze in Holzkästen, wobei solche aus Eichen- oder Buchenholz ausscheiden müssen, ist für Normalgewichte nicht geeignet. Diese stellt man besser frei auf eine Unterlage aus Glas oder Porzellan und bedeckt sie mit einer Glocke.

Um die Beträge in einem gewissen Bereich mit möglichst wenigen Stücken hinreichend abstufen zu können, wäre eine Stückelung der Gewichtsätze nach Potenzen von 2 zweckmäßig, da man mit n Stücken eine 2^n-fache Zahl von Beträgen zusammenstellen könnte. Der Übersicht und der besseren Vergleichung der Stücke halber stückelt man nach Dekaden, und in jeder Dekade sind die folgenden Unterteilungen im Gebrauch:

1	1	2	5	
1	2	2	5	
1	2	3	4	5.

Die dritte hat den Vorteil, daß sie nicht zwei Stücke desselben Betrages aufweist und daß sich manche Beträge mit weniger Stücken zusammen setzen lassen. Der ersten Reihe wird der besseren Vergleichung wegen noch ein überschüssiger Einer hinzugefügt.

Zur Auswertung eines Satzes wird ein Stück an ein Normalgewicht angeschlossen, während die übrigen in sich in den möglichen Kombinationen verglichen und die Beobachtungen für die Aufstellung einer Korrek

4. Reduktion auf den leeren Raum.

Da man die Wägungen an der Atmosphäre vornimmt, so verlieren alle Körper so viel an Gewicht, wie die von ihnen verdrängte Luft wiegt. An der Wage selbst macht sich der Auftrieb der Luft nicht bemerkbar, da er auf beide Seiten gleich einwirkt. Anders ist es mit den Belastungen der Wage. Hat die zu wägende Masse M das Volumen v_M und die Dichte s_M, die Gewichtstücke G das Volumen v_G und die Dichte s_G und bedeutet γ das spezifische Gewicht der Luft, so ist

$$M = G + \gamma (v_M - v_G) = G\left(1 - \frac{\gamma}{s_M} - \frac{\gamma}{s_G}\right).$$

Jede genaue Wägung erfordert also die Bestimmung von γ, die abhängt von der Temperatur im Wagekasten, dem Barometerstand und dem Feuchtigkeitsgehalt. Im Mittel wird man $\gamma = 0{,}001\,21$ annehmen können, einen Wert, welcher selten um mehr als 0,00015 von dem wahren abweicht, so daß für viele Zwecke die Schwankungen der Luftdichte außer Betracht bleiben, zumal wenn für symmetrische Belastung beider Wagschalen gesorgt wird. So ist z B darauf zu achten, daß man großen Gefäßen und Schalen nicht durch Gewichtstücke das Gleichgewicht hält, sondern durch Körper von ähnlicher Form Für genaue Messungen wird die Luftdichte Tabellen entnommen, wobei man in Ermangelung von Beobachtungen die Feuchtigkeit zu 50% annehmen kann.

Wegen des Einflusses der Luft auf die Wägungen hat man für die Vergleichungen von Normalgewichten Vakuumwagen eingeführt, bei denen das Gehäuse aus Metall besteht und ausgepumpt werden kann. Die Erwartungen, welche man auf diese Apparate setzte, haben sich jedoch nicht erfüllt. Abgesehen davon, daß ihr Mechanismus schwierig und umständlich ist, weil die Arretierung, die Vertauschung und das Auflegen der Gewichte in dem abgeschlossenen, wenig übersichtlichen Gehäuse vor sich gehen mußte, so verfehlten die Wägungen ihren Zweck, da die Gewichte in der Atmosphäre Gase und Feuchtigkeit adsorbieren und diese im Vakuum so langsam abgeben, daß sich schwer ein Gleichgewichtszustand bildet. Die dabei eingetretene Gewichtsverminderung verliert sich dann wieder, wenn das Gewicht an die Luft zurückkommt, so daß der Zweck einer genaueren Bestimmung verlorengeht. Dazu kommt, daß der Temperaturausgleich im Wagekasten mit dem Wegfall der Konvektion sehr erschwert ist.

Viertes Kapitel.

Volumen.

1. Einheiten.

Das Maß für das Volumen kann ebenso wie für die Fläche aus d
Längenmaß abgeleitet werden: wir erhalten damit das Kubikzentime
(ccm oder cm³). Das Volumen eines Körpers durch die lineare Ausmessu
zu bestimmen, ist nur bei regelmäßigen Gestalten möglich und sell
hier nicht besonders genau. Man vergleicht es daher mit dem Volum
einer Wassermasse durch Wägung. Hierbei gilt als Einheit das Volum
von 1 kg Wasser bei 4° und dem Druck einer normalen Atmosphäre, d
man Liter (l) nennt.

Früher im Gebrauch, aber jetzt meist aufgegeben ist die MOHRsc
Einheit, das Volumen von 1 kg Wasser bei 17,5°, in Luft mit Messir
gewichten gewogen; sie ist = 1,002 34 l.

Die Absicht, die man bei der Aufstellung des metrischen Syster
hegte und die dahin ging, 1 kg gleich dem Gewicht von 1 Kubikdezimet
Wasser von 4° zu machen, ist nicht ganz erreicht. Das Verhältnis beid
ist endgültig durch drei Arbeiten des Internationalen Bureaus[1]) mit de
Ergebnis bestimmt, daß 1 l = 1000,027 cm³ ist. Zu diesem Zwec
wurde einerseits das Volumen eines regelmäßigen Körpers durch Messu
der linearen Dimensionen bestimmt, andererseits das Gewicht ein
gleich großen Wasservolumens durch die hydrostatische Wägung d
Körpers.

GUILLAUME benutzte drei Bronzezylinder von 10, 12 und 14 cm Hö
und 10, 11,5 und 13 cm Durchmesser, deren Abmessungen auf dem Ko
parator mit Hilfe von Anschiebezylindern ermittelt wurden. CHAPPU
maß die Kantenlänge von drei Würfeln (4, 5 und 6 cm) nach dem Ve
fahren von MICHELSON auf optischem Wege aus, während MACÉ DE L
PINAY und BUISSON zur Messung der linearen Abmessungen zwei
Quarzwürfel (4 und 5 cm Kantenlänge) folgendes Verfahren anwandte.
Einmal erzeugten sie Interferenzen gleicher Neigung zwischen d
Büscheln einer homogenen Lichtquelle, die an den gegenüberliegend
Würfelflächen reflektiert werden, woraus für deren Abstand l fol
(s. S. 23): $2\,n\,l = (\nu + \varepsilon)\,\lambda$, wo n den Brechungsindex des Quarzes b
zeichnet. Andererseits beobachteten sie TALBOTsche Streifen dur
Interferenz von Strahlen, die den Würfel durchsetzten, mit dene
die daneben durch Luft gingen. Daraus folgt: $2\,(n - n')\,l = (\nu' + \varepsilon')$
wo n′ den Brechungsindex der Luft bedeutet. Aus den beiden Gleichung
läßt sich l und n berechnen Ist die Dicke l annähernd bekannt, so g

nügt es auch hier, bei der Verwendung mehrerer Farben die Überschüsse ε und ε' zu bestimmen. Um das Verhältnis von Dezimeter und Liter auf $1 \cdot 10^{-6}$ zu erhalten, muß die Würfelkante im Mittel auf etwa $^1/_{20}$ Streifenbreite gemessen werden, wobei zu beachten bleibt, daß Quarz an verschiedenen Stellen kleine optische Unterschiede aufweisen kann. Für das Volumen von 1 kg reinen, luftfreien Wassers bei 4° ergaben die drei Arbeiten die Werte 1,000 020, 1,000 020 und 1,000 027 Kubikdezimeter.

2. Auswägung von Gefäßen.

Meistens handelt es sich darum, das Volumen von Glasgefäßen zu bestimmen: größere wägt man mit Wasser, kleinere mit Quecksilber aus, da für diese Flüssigkeiten am genauesten bekannt ist, wie sich das Volumen mit der Temperatur ändert. Man unterscheidet bei benetzenden Flüssigkeiten die Prüfung auf Einguß und Ausguß: letztere ergibt das Gewicht um die Benetzung kleiner und ist wegen der Unregelmäßigkeit des Abtropfens weniger genau.

Wägt man mit Messinggewichten ($s_G = 8{,}4$) bei einer Wasserdichte s_w den Wasserinhalt eines Gefäßes und findet M g, so ist das Volumen in ml $\frac{M}{s_w}\left(1 + \frac{0{,}00121}{s_w} - \frac{0{,}00121}{8{,}4}\right) \sim M\,(2{,}001\,00 - s_w)$. Der Flüssigkeitsspiegel wird gewöhnlich durch Marken begrenzt, die auf die Glaswand geätzt sind. Man stellt bei Wasser den unteren, bei Quecksilber den oberen Rand der Kuppe ein und vermeidet die Parallaxe sicher und einfach bei der Ablesung, wenn der Begrenzungsstrich länger als der halbe Gefäßumfang ist.

Engere Röhren wägt man mit Quecksilber aus, wobei 1 g dieser Flüssigkeit, mit Messinggewichten in Luft gewogen, bei t° das Volumen (ml) $0{,}073\,81\,(1 + 0{,}000\,182\,[t - 20])$ besitzt. Die Kuppen an den Enden des Quecksilberfadens, wegen deren das Volumen etwas zu groß ausfällt, kann man als Kugelabschnitte betrachten. Man mißt ihre Pfeilhöhe h und bringt von der Entfernung der Kuppen beiderseits etwa 0,4 h in Abzug. Für Rohrweiten von 14—24 mm kann man das Volumen der Kuppe der Tabelle von SCHEEL und HEUSE[2]) entnehmen.

Die folgende Tabelle enthält die spezifischen Gewichte von Wasser und Quecksilber zwischen 0° und 30°; für andere Temperaturen wird auf die Wärmetabellen der P.-T.-Reichsanstalt[3]) verwiesen.

---

[2]) K. SCHEEL und W. HEUSE, Ann. Phys. 33, 291. 1910.

[3]) L. HOLBORN, K. SCHEEL, F. HENNING, Wärmetabellen der Physikalisch-Tech-

Spez. Gewicht von Wasser und Quecksilber.

t	Wasser	Quecksilber	t	Wasser	Quecksilber
0°	0,999 868	13,595 5	15°	0,999 126	13,558 5
1	927	593 0	16	8 970	556 0
2	968	590 5	17	8 801	553 5
3	992	588 0	18	8 622	551 1
4	1,000 000	585 6	19	8 431	548 6
5	0,999 992	583 1	20	8 230	546 2
6	968	580 6	21	8 019	543 7
7	929	578 2	22	7,797	541 2
8	876	575 7	23	7 564	538 8
9	808	573 2	24	7 322	536 3
10	727	570 8	25	7 071	533 9
11	632	568 3	26	6 810	531 4
12	525	565 8	27	6 539	529 0
13	404	563 4	28	6 259	526 5
14	0,999 271	560 9	29	5 971	524 1

3. Volumeter.

Ein Volumen v, dessen Auswägung mit einer Flüssigkeit nicl möglich ist, läßt sich in der Weise bestimmen, daß es an einen au gemessenen Raum v′ angesetzt wird, welcher mit einem Quecksilbe manometer in Verbindung steht. Damit wird der Druck einer a geschlossenen Luftmenge gemessen, einerseits wenn sie das Volumen einnimmt, andererseits wenn sie auf das Volumen v + v′ vertei ist. Bedeuten p und p′ die gemessenen Drucke, so ist nach dem BOYL MARIOTTEschen Gesetz

$$pv = p'(v + v') \text{ und } v = \frac{p'v'}{p - p'}.$$

Wählt man für das Volumen v ein Gefäß, dessen weite Öffnung luf dicht, z. B. durch einen Fettschliff mit einer Platte zu verschließen is nachdem ein fester Körper hineingelegt worden ist, so läßt sich dess Volumen aus dem Unterschied einer Messung mit gefülltem und leere Gefäß ermitteln. Das Verfahren kommt besonders für die Volume messung poröser Körper, wie Kork, Kohle, in Frage, setzt allerdin voraus, daß diese die Luft nicht adsorbieren.

In bezug auf die Druckmessungen wird auf das Gasthermometer ve wiesen. Sie können einfach sein, da die Genauigkeit durch die Schwieri keit, die Temperatur konstant zu halten, bei den gebräuchlichen Anor nungen beschränkt wird.

Fünftes Kapitel.

Dichte.

Die Einheit der Dichte besitzt ein Körper, von dem 1 cm^3 1 g wiegt. Hiernach hat Wasser von 4° die Dichte 0,999 973 cm^{-3} g.

Spez. Gewicht ist das Verhältnis zwischen dem Gewicht eines Körpers und eines gleichen Volumens Wasser von 4° Vernachlässigt man den Unterschied zwischen Kubikzentimeter und Milliliter, so ist das spez. Gewicht (eine unbekannte Zahl) numerisch gleich der Dichte.

Spez. Volumen ist das Volumen des Gramms, also gleich der reziproken Dichte und Molekularvolumen das Volumen, das ein Mol (Gramm-Molekül) einnimmt.

1. Pyknometer.

Die Volumenbestimmung von Gefäßen liefert ein Verfahren für die Dichtemessung von Flüssigkeiten· Von einem Gefäß, für diesen Zweck Pyknometer genannt, ermittelt man durch eine Auswägung mit Wasser das Volumen, füllt es darauf mit der Flüssigkeit, deren Dichte zu bestimmen ist, und wägt deren Masse. Die Beobachtungen sind auf das Vakuum zu reduzieren. Gebräuchliche Formen für Pyknometer stellt Fig. 19 dar. Der Stand der Flüssigkeit wird unter Beobachtung der Temperatur an einer Marke des Halses oder an der Teilung der Kapillare abgelesen; enthält das Pyknometer kein Thermometer, so muß man es in ein Wasserbad einsetzen. In das SPRENGELsche Pyknometer (Form rechts) wird die Flüssigkeit eingesaugt.

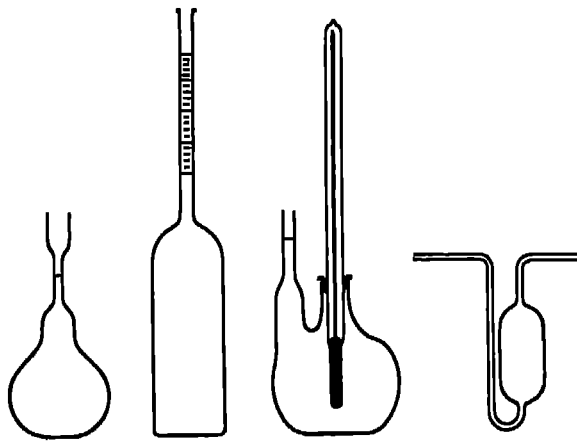



Fig. 19. Pyknometer.

Auch die Dichte fester Körper läßt sich mit dem Pyknometer bestimmen. Wiegt dieses mit Wasser M, mit Wasser und dem Körper M′, während der Körper selbst m wiegt, so erhält man für die verdrängte Wassermenge: $v_w = M + m - M'$ und für die Dichte $s = m/v_w$. Für die Genauigkeit ist es günstig, möglichst viel Wasser aus dem Pyknometer zu verdrängen, wobei darauf zu achten ist, daß an dem festen Körper

2. Hydrostatische Wägung.

Das hydrostatische Verfahren benutzt das Archimedische Prinzip nach dem ein in Wasser eingetauchter Körper um das Gewicht der vo ihm verdrängten Wassermenge leichter wird Wiegt der Körper in de Luft M, unter Wasser M', so ist der Auftrieb $v = M - M'$ und die Dicht $s = M/v$.

Das Gewicht M wird nach den oben gegebenen Vorschriften bestimmt Zur Ermittlung von M' hängt man an die eine Wagschale mit einer dünnen Draht einen Korb oder Halter, der in ein unter dem Wagekaste befindliches Gefäß mit Wasser taucht Man wägt abwechselnd den leeren un den mit dem Körper belasteten Korb wobei vielfach die Einrichtung getroffe wird, den Korb unter Wasser zu ent lasten, wie Fig. 20 zeigt, wo der z wägende Würfel durch Heben des Tische A von seinem Halter zu befreien ist.

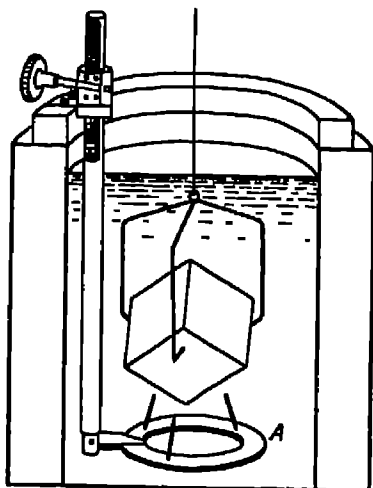



Fig. 20. Wägung unter Wasser.

Da eine Vertauschung der Wagearm zu umständlichen Verfahren führt, wäg man nach dem BORDAschen Substitutions verfahren. Die Dämpfung der Wage is so groß, daß die Ruhelage beobachte wird. Bei Aufhängungen mit blanken Draht ist sie unregelmäßigen Schwan kungen infolge des kapillaren Wulste unterworfen, die dadurch vermieden werden, daß man nach F. KOHLRAUSCH (1895) einen Platindraht benutzt, welcher elektrolytisch mit Platinmoh überzogen und schwach ausgeglüht ist. Außerdem wird die Einstellun der Wage mehrfach nach erneutem Arretieren und Lösen der Wag wiederholt.

Die Dichte des luftfreien Wassers vermindert sich durch die Aufnahm von Luft bis zur Sättigung nur um $3 \cdot 10^{-6}$ [1])

Flüssigkeiten wägt man unter Wasser in Gefäßen, wenn es sich un fundamentale Messungen, wie z. B. die Dichte des Quecksilbers[2]), handelt Sonst benutzt man einen Senkkörper, meistens ein an einem feinen Drah hängendes kurzes, dickes Thermometer, das in Luft (M), in Wasser (M' und in der Flüssigkeit (M'') gewogen wird. Der Auftrieb im Wasser is dann $v_w = M - M'$ und in der Flüssigkeit $v_f = M - M''$, so daß man fü die Dichte erhält: $s = v_f/v_w$.

[1]) P. CHAPPUIS, Travaux et Mémoires du Bureau intern. XIV. 1910.

Für diese Art Wägungen bedient man sich oft der MOHRschen Wage, bei der nur der eine Arm mit einem Gehänge versehen, während der andere kurz gehalten ist und ein konstantes Gegengewicht trägt. Der erste, an welchem der Senkkörper hängt, ist in zehn Abschnitte geteilt, die durch Kerben oder durch Schneiden begrenzt sind. An diesen Stellen werden Reiter aus hakenförmig gebogenen Drahtstücken aufgehängt, von denen der schwerste die erste Dezimale, der folgende die zweite usw angibt. Ist der Balken richtig geteilt und stehen die Gewichte der aufeinanderfolgenden Reiter genau im Verhältnis 10 · 1, so muß die Wage noch, wenn sie bei 15° richtige Dichten anzeigen soll, unter folgenden Bedingungen einspielen. Senkkörper in Luft, dritter Reiter auf 1, vierter auf 2; Senkkörper in Wasser von 15°, erster, zweiter und dritter Reiter auf 9, vierter auf 1 (entsprechend der Dichte 0,9991). Die erste Bedingung ist durch die Verschiebung des Gegengewichts zu erfüllen, die zweite durch das Abschleifen des Senkkörpers, wenn zu hohe Dichten angegeben werden. Sonst sind alle Anzeichen im Verhältnis der wahren zu der abgelesenen Wasserdichte zu erhöhen. Die Genauigkeit reicht bis zu einer Einheit der vierten Dezimale, wenn der Einfluß der Kapillarität auf den Aufhängedraht berücksichtigt wird.

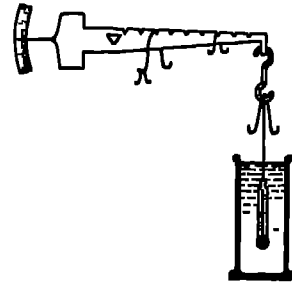



Fig. 21. Mohrsche Wage.

Mit einem Senkkörper von 910 cm³ hat F. KOHLRAUSCH die Dichte verdünnter wäßriger Lösungen (bis 1,005) beobachtet in dem Temperaturbereich von 4° bis 8°, wo die Ausdehnung des Glaskörpers derjenigen der Lösung gleichkommt, die Temperatur also geringen Einfluß auf den Auftrieb ausübt. Hierbei wurde eine Genauigkeit von einer Einheit der siebenten Dezimale erreicht.

Bei allen diesen Bestimmungen brauchen die Gewichte nicht absolut richtig zu sein; es genügt, daß sie in Luft relativ miteinander stimmen. Zur Reduktion des Ergebnisses auf Wasser von 4° und auf das Vakuum ist zu bedenken, daß das Gewicht M eines Körpers in Luft um μ zu vermehren ist, wenn er die Luftmenge μ verdrängt. Das Gewicht v_w des gleichen Wasservolumens beträgt im Vakuum ebenfalls $v_w + \mu$, sei es, daß dieses Gewicht mit dem Pyknometer oder mit dem Senkkörper bestimmt wurde. Hat man ferner bei der Temperatur t beobachtet, so ist die Wasserdichte von 1 verschieden, sie sei D_t. Alsdann folgt für den auf das Vakuum und die Wasserdichte 1 reduzierten Wert der Dichte:

$$\frac{(M+\mu)\,D_t}{\ldots} = \frac{M}{\ldots}\,(D_t - \ldots) + \ldots = \frac{\gamma\,(D_t+\mu)}{\ldots} = \frac{\gamma\,v_w}{\ldots}$$

3. Aräometer*).

Auf dem Gesetz des Auftriebs beruht auch die Senkwage oder d Aräometer. Die NICHOLSONsche Wage (Fig. 22) besteht aus einem spind förmigen Hohlkörper aus Glas oder Blech, der oben auf einem dünn Halse einen Teller und unten einen Korb trägt, welcher auch verkel angehängt werden kann. Der Schwerpunkt muß tief liege damit das Instrument aufrecht schwimmt. Wiegt es M g u muß man auf den Teller noch m oder m′ g legen, damit in Wasser oder in einer Flüssigkeit bis zu einer Marke d Halses einsinkt, so ist für die Dichte s der Flüssigk $s = \frac{M + m'}{M + m}$. Die Dichte eines festen Körpers bestim man in der Weise, daß er nacheinander auf dem Teller u im Korbe tariert wird, wodurch man den Gewichtsverl erhält. Ist der Körper leichter als Wasser, so hält man i unter dem umgehängten Korbe fest.

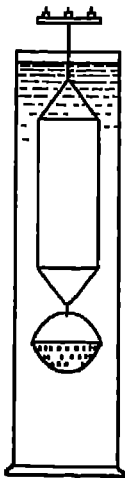



Fig. 22. Senkwage.

Die Skalenaräometer, meist aus Glas, bilden eine Spindel n einem dünnen röhrenförmigen Stengel, der gewöhnlich ei Papierskale einschließt (Fig. 23). Unten sind die Instrumen durch Quecksilber oder Schrot oder durch ein Thermomet beschwert. Für einen zylinderförmigen Stengel erhält m eine gleichmäßige Teilung, wenn diese nach reziproken Dic ten fortschreitet. Die Genauigkeit der Messung ist begrenzt durch den k pillaren Wulst, der an der Flüssigkeitsoberfläche dem Stengel anhaftet u der mit der Flüssigkeit wechselt, so daß ein allgemein v wendbares Aräometer nur die zweite Dezimale sicher gil

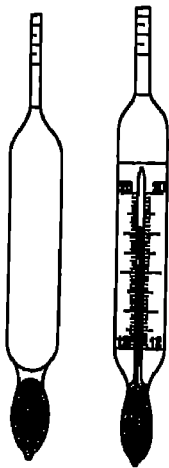



Fig. 23. Aräometer.

Genauere Instrumente, die bis zur vierten Dezim zuverlässig sind, gelten immer nur für eine bestimm Flüssigkeit und liefern für solche, welche eine ande Kapillarkonstante aufweisen, falsche Angaben. B zeichnet s die Dichte der Flüssigkeit und γ die der Lu α' den senkrechten Querschnitt des kapillaren Wulst (in mm^2), M die Masse des Aräometers (in mg), V se Gesamtvolumen (in mm^3), V_0 sein Volumen bis zu untersten Teilstrich, ferner u den Umfang und q d Querschnitt des Stengels, endlich l den Abstand c untersten Teilstriches von der Flüssigkeitsoberfläch so ist die Bedingung für das Gleichgewicht:

$$M + \alpha' u s = (V_0 + lq) s + (V - V_0 - lq) \gamma + \alpha' u \gamma$$

oder

$$M - V\gamma + \alpha' u (s - \gamma) = (V_0 + lq)(s - \gamma).$$

$M - V\gamma$ bedeutet hier das Gewicht in Luft, und α' verhält sich zu der gebräuchlichen Kapillaritätskonstante α (mg/mm) wie 1 : s.

Ein nach dieser Gleichung berechnetes Aräometer wird die Dichte nur bei einer Temperatur t, für welche das Volumen des Glaskörpers V ist, richtig anzeigen. Benutzt man es bei einer anderen Temperatur t', so sind die Ablesungen wegen der Glasausdehnung um $-\frac{(t'-t)\,s}{40\,000}$ zu korrigieren.

In manchen Flüssigkeiten, besonders Wasser und wäßrigen Lösungen, zeigen sich Unregelmäßigkeiten bei der Benetzung des Stengels, die wegfallen, wenn er vor dem Eintauchen mit Alkohol abgerieben wird. Für die Prüfung der Instrumente benutzt man bestimmte Flüssigkeiten: Benzol und Petroleumdestillate von $s = 0{,}6$ bis $1{,}02$, Alkohol-Wasser von $s = 0{,}8$ bis $0{,}95$, Alkohol-Glyzerin von $s = 0{,}95$ bis $1{,}2$, Alkohol-konz. Schwefelsäure von $s = 0{,}9$ bis $1{,}8$, Glyzerin-Wasser von $s = 1{,}1$ bis $1{,}2$ usw. Man liest von unten durch die Flüssigkeit ab und bringt das Auge in solche Höhe, daß der Berührungsring als Linie erscheint. Die Dichte der Flüssigkeit wird durch eine hydrostatische Wägung ermittelt.

Es genügt, auf diese Weise das Aräometer am Anfang der Teilung zu prüfen. Die weiteren Teilstriche untersucht man nach einem von F. NEUMANN angegebenen Verfahren, indem man kleine Zulagegewichte μ auf den Stengel legt. Wächst dadurch das benetzte Volumen von V_0 um ΔV, so ist $M + \mu = s(V_0 + \Delta V)$.

Für viele Flüssigkeitsgemische sind Aräometer im Handel. Von willkürlichen Skalen hat sich die nach BAUMÉ erhalten, für welche bei 15° $s = \frac{144{,}3}{144{,}3 \mp B}$; das negative Zeichen gilt für Dichten über 1,0, das positive für solche unter 1,0; z. B. 24° Baumé bedeutet die Dichte 1,2.

Um die durch die Kapillarität bewirkte Ungenauigkeit zu vermeiden, hat NANSEN zur Untersuchung des Seewassers Aräometer[4]) eingeführt, die ganz untertauchen. Es sind Glaskolben mit einem kurzen Stengel, die so abgemessen sind, daß sie bei einer bestimmten Temperatur in reinem Wasser gerade schweben. Aus der Wasserdichte ergibt sich das Volumen des Aräometers, mit dem man andere Dichten dadurch mißt, daß kleine Platiniridiumdrähte um den Stengel gelegt werden. Die Genauigkeit, die einige Einheiten der sechsten Dezimale erreicht, wird begrenzt durch die großen Anforderungen, die an die Gleichmäßigkeit der Wassertemperatur gestellt werden.

Ein solches Schwebeverfahren ist auch gebräuchlich für die Bestimmung der Dichte fester Körper, z. B. kleiner Kristalle, die man in Flüssigkeiten großer Dichte, wie Mischungen von Chloroform (1,52), Bromoform (2,9) oder Methylenjodid mit Benzol (0,88) oder Toluol (0,89), zum Schweben bringt Die Dichte der Mischung wird mit der hydrostatischen Wage bestimmt.

4. Dichte der Gase und Dämpfe.

Mehr als die Dichte der festen und flüssigen Körper hängt die der Gase von der Temperatur und besonders vom Druck ab. Bezieht man, wie gebräuchlich, das Volumen v_0 eines Gases auf 0° und den Druck einer normalen Atmosphäre (760 mm Quecksilbersäule), so ist das Volumen v bei t° und dem Druck p nach dem BOYLE-GAY-LUSSACschen Gesetz: $v = \frac{760\, v_0 (273 + t)}{273\, p}$. Außer der Wägung ist also eine genaue Messung des Drucks und der Temperatur für die Bestimmung der Dichte notwendig.

Man pflegt die Gasdichte anzugeben durch die Masse L (in g), welche ein Liter unter den normalen Bedingungen faßt. Nun nimmt ein Mol (Gramm-Molekül) eines Gases nach der AVOGADROschen Regel den Raum von 22,414 Normalliter ein, so daß, wenn M das Molekulargewicht bezeichnet, $M = 22{,}414\, L$. Streng genommen gilt diese Gleichung jedoch nur für den idealen Gaszustand, dem sich die wirklichen Gase erst bei kleinem Druck nähern. Selbst bei dem Druck von 1 Atm. und bei 0° entsprechen diese noch nicht genau dem BOYLE-MARIOTTEschen Gesetz: Helium, Wasserstoff und Neon sind weniger, alle anderen Gase mehr zusammendrückbar, als es jenes Gesetz verlangt. Wir führen deshalb eine Korrektion in die Gleichung ein und schreiben $M = \frac{22{,}414\, L}{1 + \lambda}$, wo λ eine kleine Zahl bezeichnet, die für die genannten Gase negativ, für alle übrigen positiv ist Der Wert von λ läßt sich aus dem Verlauf der Isotherme entnehmen, welche das Produkt pv als Funktion des Drucks p darstellt, wenn wir die Schnittpunkte dieser Kurve mit den Ordinaten p = 0 und p = 1 bilden. Denn es ist $1 + \lambda = \frac{(p\,v)_0}{(p\,v)_1}$.

Nach dem BOYLE-GAY-LUSSACschen Gesetz ist p v/T für irgendeine Menge eines idealen Gases eine Konstante Beziehen wir den Ausdruck bei 0° und normalem Druck auf ein Mol, so ist v für alle Gase gleich 22,414 l und für p = 1 Atm. der Wert von 1 013 300 Bar und für 0° die absolute Temperatur T = 273,2 eingesetzt, erhält man für die Gaskonstante R in absolutem Maß: $R = \frac{1\,013\,300 \cdot 22\,414}{273{,}2}$ oder

Die Bestimmung von Gasdichten hat in den Fällen, wo sie unter den normalen Bedingungen, also bei 0° und 1 Atm., ausgeführt werden kann, eine so große Genauigkeit erreicht, daß die Ergebnisse denen aus den besten Atomgewichtsmessungen gleichwertig sind. Vielfach aber besteht das Bedürfnis nach weniger genauen, aber leichter ausführbaren Bestimmungen, namentlich wenn es sich darum handelt, die Dichte eines Stoffes zu messen, der erst bei höherer Temperatur gasförmig wird, also eines Dampfes, bei dem Messungen bei 0° nicht möglich sind. Es ist unbequem, diese auf Wasser zu beziehen, wie es mit dem Gewicht des Normalliters geschieht. Man zieht es vor, diese Dampfdichte auf die der Luft zurückzuführen, eines Körpers, dessen Druck und Volumen sich ebenso mit der Temperatur ändert wie der zu untersuchende Stoff. Da das Molekulargewicht der Luft 29,0 ist, so erhält man, wenn d die Dichte eines Gases oder Dampfes, bezogen auf Luft von derselben Temperatur, darstellt, für das Molekulargewicht $M = 29{,}0\ d$. Auch diese Gleichung gilt streng nur für den idealen Zustand, der natürlich für Dämpfe noch weniger besteht als für Gase. Um wenigstens einen Anhalt hierüber zu gewinnen, kann man bei zwei Werten von p beobachten und unter der Annahme, daß sich pv linear mit p ändert, auf $p = 0$ extrapolieren und aus diesem Wert das Molekulargewicht M ableiten.

Da die Verfahren zur Bestimmung der Gasdichte und der Dampfdichte gemeinsame Grundlagen haben, so sollen beide nebeneinander behandelt werden.

Das gebräuchlichste Verfahren zur Bestimmung der in dem Normalliter enthaltenen Gasmenge rührt von Regnault her. Man wägt einen Glaskolben erstens leer und zweitens, nachdem er mit dem Gase bei 0° und 1 Atm. gefüllt worden ist, wobei jedesmal ein zweiter Kolben von gleichem Volumen als Gegengewicht dient. Das Volumen V des ersten Kolbens ermittelt man durch eine Auswägung mit Wasser. Zu beachten bleibt dabei, daß der Auftrieb in der Luft bei dem leeren Kolben, der durch den Luftdruck etwas komprimiert wird, kleiner ist als bei dem mit Gas gefüllten. Dieser Unterschied, auf den zuerst Agamennone (1885) aufmerksam machte, war merklicher bei den früher benutzten großen und dünnwandigen Kolben, als bei den jetzt gebräuchlichen von $^1/_2$ bis 1 l Inhalt mit stärkerer Wand.

Der Kolben hat zweckmäßig Kugelgestalt, an die sich eine Kapillare mit Hahn ansetzt. Oberhalb des Hahnes besitze die Kapillare noch eine kleine Erweiterung, die gerade hinreicht, das Wasser aufzunehmen, das aus der bei 0° bis zum Hahn gefüllten Kugel austritt, wenn sie sich auf die Temperatur des Wagekastens erwärmt. Zum Füllen umgibt man

gewicht jedesmal mit nassem Leinen ab, bevor sie auf die Wage gesetz wird, wo sie über Nacht stehen bleibt und am folgenden Tage ge wogen wird.

Findet man für das Gewicht des mit Wasser gefüllten Kolbens mi Messinggewichten den Wert M′ und für den leeren (ausgepumpten Kolben M″, so ist für das Volumen V, wenn γ die Luftdichte bedeutet $V = \frac{M' - M''}{0{,}99987}\left(1 - \frac{\gamma}{8{,}4}\right)$. Wird statt M″ das Gewicht $M'' + \mu$ des mi Luft gefüllten Kolbens eingesetzt, so wäre noch das Gewicht der in de Kugel enthaltenen Luft mit abzuziehen. Darauf füllt man den Kolbe bei 0° mit dem zu untersuchenden Gase vom Druck p, der je nac der Anordnung am Barometer oder an einem besonderen Manomete abzulesen ist. Beträgt das Gewicht nun M‴ und entsprechen ferne den Gewichten M″ und M‴ die Volumina V″ und V‴ des Kolbens so erhält man $L = \frac{760}{pV}\left(M''' - M'' + \gamma\,(V''' - V'')\right)$.

Zur Bestimmung der Kontraktion V‴—V″, welche der Kolben infolg des Evakuierens erfährt, wird er mit Wasser gefüllt und in ein ge schlossenes, mit Wasser gefülltes Gefäß gebracht. Man läßt hierauf eine Druck wirken, der an einem Manometer zu messen ist, und beobachte das Steigen der Wasserkuppe in der Kapillare, die aus dem Gefäß herausragt.

Ein anderes Verfahren, Gewicht und Volumen der Gasmenge zu be stimmen, besteht darin, daß man diese aus dem Kolben von bekannten Volumen in einen gewogenen Apparat überführt, wo sie verdichtet ode durch eine Flüssigkeit absorbiert wird, z. B. Ammoniak oder Stickoxy durch Holzkohle, Kohlensäure durch Kalilauge. Die Wägung des Appa rates vor und nach dem Einleiten des Gases ergibt das Gasgewicht Sie wird ebenfalls mit einem Gegengewicht von passender Gestalt aus geführt. Umgekehrt läßt sich auch das von einem Körper absorbiert Gas austreiben und der dadurch verursachte Gewichtsverlust bestimmen sowie das Volumen der Gasmenge in einem kalibrierten Gefäß messen In dieser Weise benutzte MORLEY (1896) z. B. den vom Palladium auf genommenen Wasserstoff.

Zur Bestimmung von Dampfdichten wird nach DUMAS (1827) ein Glas kolben mit einem zur Spitze ausgezogenen Ansatzrohr und einem Inhal von etwa $^1/_4$ l benutzt, in welchen einige Gramm der zu verdampfende Flüssigkeit gefüllt werden. Darauf erwärmt man den Kolben in einem Bade 20—30° über den Siedepunkt so lange, bis kein Dampf mehr ent weicht, schmilzt alsdann nach Beobachtung der Badtemperatur und de

Abkühlung wird der Kolben gewogen und alsdann sein Volumen bestimmt, indem die Spitze unter Wasser abgebrochen wird. Dieses füllt ihn alsdann bis auf eine kleine Luftblase aus, die ebenfalls noch mit dem Inhalt einer Spritzflasche verdrängt wird. Zuletzt wird der Kolben nebst abgezogener Spitze gewogen.

Es sei das Gewicht des mit Luft, Dampf oder Wasser gefüllten Kolbens m', m'' und m'''; ferner Temperatur und Luftdruck im Wagekasten t' und p', beim Zuschmelzen des Kolbens t'' und p'' und die zu t' und p' gehörige Dichte der Luft γ'. Alsdann ergibt sich für die Dampfdichte d:
$$d = \left(\frac{m'' - m'}{m''' - m'} \frac{s - \gamma'}{\gamma'} + 1\right) \frac{p'}{p''} \frac{273 + t''}{273 + t'} \left(1 - \frac{t'' - t'}{40\,000}\right),$$
wo s die Dichte des Wassers und $^1/_{40\,000}$ für den Ausdehnungskoeffizienten des Glases angenommen ist. Soll noch das Volumen der Luftblase berücksichtigt werden, das der Dampf nicht ausgefüllt hat, so wägt man schon vor dem Auffüllen mit Wasser. Ergibt sich dabei das Gewicht m_1, so ist das Volumen der Luftblase $v''' = (m''' - m_1) / (s - \gamma'')$ und bei dem Zuschmelzen des Kolbens $v'' = v''' p' (273 + t'') / p'' (273 + t')$. Die Dampfdichte ist also bestimmt für ein Gemisch von v'' Raumteile Luft und V Teile Dampf, wo $V = \frac{m''' - m'}{s - \gamma'}\left(1 + \frac{t'' - t'}{40\,000}\right)$, und die Dichte d' des reinen Dampfes ist: $d' = (V d - v'') / (V - v'')$.

Soll bei der Wägung des Dampfes der große Ballast des Kolbens vermieden werden, so kann man die Spitze nach dem Zuschmelzen in ein Kältebad tauchen, den Dampf darin kondensieren und ihn darauf in der abgezogenen Spitze wägen. Von diesem Bruttogewicht ist alsdann die Tara der leeren Spitze abzuziehen.

Nach HOFMANN (1867) wird das Volumen und der Druck eines bestimmten Dampfgewichts in einem kalibrierten Barometerrohr gemessen (Fig. 24). Der abgewogene und verdampfte Stoff wird in einem kleinen dünnwandigen Glasfläschchen, das durch einen Stopfen verschlossen ist, von unten in das mit trockenem Quecksilber gefüllte Rohr eingeführt, in dessen Vakuum der Stoff entweicht und verdampft. Die Temperatur des Dampfes wird durch einen auf dem Rohr angebrachten Dampfmantel mindestens 10° über den Siedepunkt des Stoffes gebracht. In vielen Fällen genügt hierzu Wasserdampf, für höhere Temperatur kann z. B. Methylbenzoat (Siedepunkt = 199,5°) verwandt werden. Der Druck des Dampfes ist gleich dem Luftdruck, vermindert um die im Verdampfungsrohr befindliche Quecksilbersäule

Fig. 24. Dampfdichte nach

dem Ausdehnungskoeffizienten des Glases auf die Temperatur des Dampfes zu korrigieren. Ist m das verdampfte Gewicht, v_t sein Volumen bei der Beobachtungstemperatur t in Liter und p der Druck, so ist $d = \frac{m}{v_t} \frac{760}{p} \frac{273 + t}{1{,}293 \cdot 273}$. Wegen der Dampfspannung des Quecksilbers, die immer eine unsichere Korrektion bleibt, weil dessen Säule die Temperatur schwer annimmt und der schwere Dampf nur langsam diffundiert, ist das Verfahren nur etwa bis 200° anwendbar

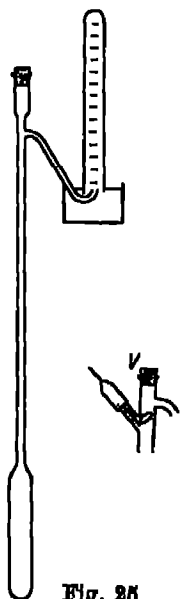
RAMSAY und STEELE[5]) sowie DRUCKER und ULLMANN[6]) beschreiben genauere Apparate, worin der Dampf bei verschiedenen Drucken und Volumina gemessen wird, was wegen der Zurückführung auf den idealen Zustand für eine genaue Molekulargewichtsbestimmung wichtig ist.

Nach VIKTOR MEYER (1878) wird die Verdampfung in einem mit Luft gefüllten Rohr bei Atmosphärendruck vorgenommen und das Dampfvolumen aus dem Volumen der verdrängten Luft bei Zimmertemperatur gemessen. Bis 400° benutzt man gläserne Dampfkolben, für höhere Temperaturen solche aus Porzellan, Platin oder Iridium Fig 25 stellt die Anordnung aus Glas dar. Das Steigrohr des Kolbens, das seitlich ein Rohr für die austretende Luft besitzt, die in einer Bürette über Wasser aufgefangen wird, trägt einen Verschluß V, aus dem man den abgewogenen, zu verdampfenden Stoff auf den mit etwas Asbest geschützten Boden fallen läßt. Der Kolben ist in einem Ofen erheblich über den Siedepunkt erwärmt, so daß der Körper nach dem Herabfallen schnell verdampft. Ist er fest, so bringt man ihn in Pastillenform, während Flüssigkeiten in zugeblasenen Glaskugeln oder mit Stopfen verschlossenen Röhrchen abgewogen und in das Dampfrohr eingeführt werden, wenn dessen Temperatur konstant geworden ist. Die Verdampfung verläuft dann in wenigen Minuten, während deren man die entweichende Luft im Meßrohr auffängt. Ist m die eingeworfene Stoffmenge, v (in Liter) das bei der Zimmertemperatur t und dem Druck p (Barometerstand minus Wassersäule des Meßrohrs) gemessene Luftvolumen, so ergibt sich für die Dampfdichte: $d = \frac{m}{v} \frac{760}{p} \frac{1 + 0{,}004\,t}{1{,}293}$; 0,004 ist hier als Ausdehnungskoeffizient der feuchten Luft angenommen.

Fig. 25 Dampfdichte nach V. MEYER.

[5]) W. RAMSAY und B. D. STEELE, ZS. f. phys. Chem. 44, 348 1903.

Wirkt der Dampf auf den Sauerstoff der Luft, so füllt man den Kolben mit einem indifferenten Gase, das man zweckmäßig durch ein besonders enges Rohr einleitet, das an das untere Ende des Kolbens angeschmolzen wird. Durch dieses Rohr kann man nach dem Versuch den Dampf auch absaugen und dann mehrere Beobachtungen schnell hintereinander wiederholen.

Stoffe, die sich bei Atmosphärendruck zersetzen, werden unter geringerem Druck verdampft, was vielfach noch mit der gewöhnlichen Anordnung möglich ist, wenn man die Verdampfungstemperatur unter dem normalen Siedepunkt hält und als indifferentes Gas Wasserstoff benutzt. Sonst läßt sich auch eine Bürette zum Auffangen des verdrängten Gases benutzen, die mit dem Verdampfungskolben verbunden ist. Durch ein Ansatzrohr, das zur Luftpumpe führt, wird vor dem Versuch in der ganzen Anordnung Unterdruck hergestellt und der Quecksilberstand abgelesen; nach der Verdampfung stellt man alsdann durch Verschieben des Quecksilberbehälters denselben Druck wieder her und beobachtet an der Bürette das Volumen des verdrängten Gases.

Endlich kann man das Volumen und den Druck des Dampfes im Verdampfungsgefäß bei hoher Temperatur bestimmen. Stark und Bodenstein[7]) benutzten hierzu eine Birne aus Quarzglas, weil eine solche sich am einfachsten mit einem Quarzmanometer verbinden ließ, das zur Bestimmung des Drucks im erhitzten Gefäß allein in Betracht kam. Es stand mit dem ebenfalls erhitzten Manometer durch eine Kapillare in Verbindung und wurde nach Beschickung mit dem zu verdampfenden Stoff evakuiert, dessen Menge nach dem Versuch bestimmt wurde. Zur Heizung benutzte man einen elektrischen Ofen, dessen Temperatur t durch ein Thermoelement gemessen wurde.

Das Verfahren ist namentlich zur Untersuchung dissoziierender Stoffe in Anwendung, wo mit steigender Temperatur infolge des Molekülzerfalls die Dampfdichte abnimmt und der Dissoziationsgrad α zu bestimmen ist. Zerfällt der Bruchteil α der Moleküle in $n\alpha$ neue, während $(1-\alpha)$ erhalten bleibt, so ist die Molekülzahl 100 auf $100\,(1 + (n-1)\,\alpha)$ gestiegen und die Dampfdichte in demselben Verhältnis kleiner geworden. Hieraus läßt sich α angeben, wenn beachtet wird, daß die Verdampfungsbirne vom Volumen v bei dem Druck p an Dampf $\frac{v}{22{,}414}\,\frac{273\,p}{760\,(273+t)}$ Mole enthält.

Auch den Auftrieb, den eine leichte Glaskugel in einem Gase erfährt, benutzt man zur Bestimmung seiner Dichte. Die Kugel ist an einem Wagebalken befestigt (Fig. 26) und wird durch ein kleines Gegengewicht

im Gleichgewicht gehalten. Balken samt Schneide werden zweckmäßig aus Quarzglas verfertigt und in ein Glasgefäß gesetzt, dem das zu messende Gas zuzuleiten ist. Das Gleichgewicht wird durch den Druck des Gases hergestellt, den man an einem Manometer abliest. Der Apparat läßt sich in kleinen Abmessungen ausführen und ist dann zur Messung geringer Gasmengen geeignet. Geeicht wird mit Luft oder einem anderen Gase von bekannter Dichte.

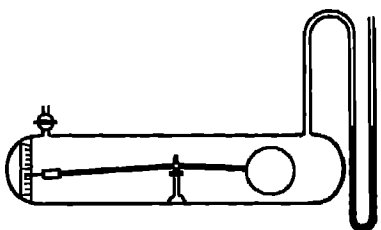



Fig 26. Gaswage.

In der Technik ist die umgekehrte Anordnung im Gebrauch: bei der Luxschen Gaswage (Fig. 27) wird nämlich das zu messende Gas durch den Wagebalken in eine große Kugel geleitet und deren Auftrieb in der Luft an einer Skale beobachtet. Auf diese Weise läßt sich z. B. die Dichte von Leuchtgas fortlaufend prüfen, indem man sie auf die der umgebenden Luft bezieht.

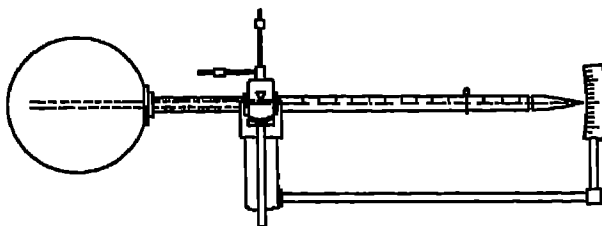



Fig. 27. Gaswage.

Läßt man gleiche Volumina zweier Gase durch eine feine Öffnung, z. B. durch ein Loch von 0,01 bis 0,1 mm Durchmesser eines Platinblechs, ausströmen, so verhalten sich bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die Quadrate der Ausströmungszeiten wie die Dichten. Bunsen (1857) hat einen Apparat angegeben, der für den Gebrauch im Laboratorium bequem ist. Ein mit einem Hahn verschließbarer Glaszylinder (Fig. 28), dessen oberes Ende das Blech mit feiner Öffnung trägt und dessen unteres offenes Ende in Quecksilber taucht, enthält das zu messende Gas und einen Schwimmer mit zwei Marken, an deren Zusammenfallen mit der Quecksilberoberfläche das Volumen des ausgeströmten Gases gemessen wird. Vor dem Einfüllen des Gases taucht der Zylinder ganz in das Quecksilber ein und hebt sich während des Einströmens allmählich. Gase, die man nicht verlieren will, läßt man nicht in die Atmosphäre, sondern in ein evakuiertes Gefäß strömen, aus dem man sie

Fig. 28. Gasausströmung

Auch bei hohen Temperaturen ist das Verfahren benutzt worden (EMICH 1903). Die Gasvolumina werden in einem Gasometer bei Zimmertemperatur gemessen, nur ein Teil des Strömungsrohrs mit der Öffnung wird geheizt. Die Ausströmungszeiten verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate der absoluten Temperaturen.

Im allgemeinen ist jedoch zu bemerken, daß die Ergebnisse nur angenäherte Werte darstellen. Nach der Theorie sollte auch das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen von Einfluß sein, was sich besonders bei dem Vergleich eines einatomigen Gases mit einem mehratomigen bemerkbar machen muß, wie ihn DONNAN[8]) ausgeführt hat. Hier sind auch die Zähigkeit der Gase und die Zusammenziehung des ausfließenden Strahls mit in Betracht gezogen. Ebenso versuchten BUCKINGHAM und EDWARDS[9]) die Abweichungen ihrer Versuche von dem einfachen Gesetz durch theoretische Überlegungen zu begründen. ULLRICH[10]) wandte das Verfahren bei erhöhter Temperatur zur Bestimmung von Dampfdichten an, wobei eine Genauigkeit von 5% erreicht wurde.

Sechstes Kapitel.

Zeit.

Die Einheit der Zeit ist die Sekunde mittlerer Sonnenzeit; sie bildet den 86400sten Teil des mittleren Sonnentages. Auf einen Sterntag, die Umdrehungszeit der Erde um ihre Achse, entfallen 86164,091 Sekunden mittlerer Zeit.

Die „wahre Zeit" ist für den Astronomen, der sie fortlaufend bestimmt, von größerer Bedeutung als für den Physiker, der meistens nur von ihr Gebrauch macht, um den Gang seiner Uhr zu kontrollieren und sich deshalb mit regelmäßigen Zeitsignalen begnügt, wie sie heute von den Funkstationen verbreitet werden.

Als normaler Zeitmesser dient die Uhr, die von einem Gewicht getrieben und von einem Pendel geregelt wird, dessen Schwingungsdauer, das ist die Zeit zwischen einer Umkehr und der folgenden auf der anderen Seite der Ruhelage, eine Sekunde beträgt. Die Schwingungsdauer hängt von der Pendellänge ab. Um diese dem Einfluß von Temperaturschwankungen zu entziehen, benutzt man bei genauen Uhren Kompensationspendel. Ihre älteste Art sind die Rostpendel (Fig. 29a), bei denen die

[8]) F. G. DONNAN, Phil. Mag. 49, 423. 1900.

[9]) E. BUCKINGHAM u. J. D. EDWARDS, Bull. Bur. Stand. 15, 573. 1920.

Linse an einer Stahlstange befestigt ist, die ihrerseits von einem nach unten verlaufenden Rahmen aus zwei Messingstangen getragen wird, von deren unteren Verbindungsbalken wiederum Stahlstangen zur Aufhängung des Pendels führen. Die Ausdehnung der Stahlstangen, durch welche sich die Linse senkt, wird durch die größere Ausdehnung der Messingstangen aufgehoben, wenn die Längen richtig bemessen sind. Bei einer anderen Ausführung (Fig. 29b) wird die Ausdehnung einer Stahlstange kompensiert durch einen Quecksilberzylinder, der in einem Glasgefäß an der Stange hängt. Beide Konstruktionen folgen wegen ihrer großen Masse den Temperaturschwankungen nur langsam. RIEFLER (1902) stellte deshalb die Pendelstange aus Invar (37% Nickel) her und kompensierte die geringe Ausdehnung dieser Legierung durch einen unten angebrachten kurzen Messingzylinder

Fig. 20. Rost-, Quecksilberpendel.

Ortsveränderungen sich bewegender Körper, namentlich periodische, beobachtet man mit der Pendeluhr nach der Auge-und-Ohrmethode. So bestimmt man z. B. die Durchgangszeit eines schwingenden Magnets durch seine Ruhelage, indem man die Zehntel Sekunden nach den Abständen der Orte schätzt, an denen er sich bei den aufeinanderfolgenden Sekundenschlägen beiderseits der Ruhelage befindet Das Mittel zweier Durchgangszeiten liefert die Umkehrzeiten und deren Unterschied die Schwingungsdauer. Bei einer genauen Messung beobachtet man eine Reihe aufeinanderfolgender Durchgänge, z. B.:

Durchgang	Umkehrpunkt	Schwingungsdauer	Mittl. Durchgangszeit
17 Min. 39,9 Sek.	17 Min. 44,55 Sek.	8,45 Sek.	
17 „ 49,2 „	17 „ 53,00 „	8,05 „	18 Min. 1,05 Sek
17 „ 56,8 „	18 „ 1,05 „	8,10 „	18 „ 1,10 „
18 „ 5,3 „	18 „ 9,15 „	8,35 „	18 „ 0,05 „
18 „ 13,0 „	18 „ 17,50 „	Mittel 8,24 Sek.	Mittel 18 Min. 1,03 Sek
18 „ 22,0 „			

Noch genauer ist es, die mittlere Durchgangszeit dieses Satzes mit einer späteren zu verknüpfen, der nach einer Pause folgende Beobachtungen

Durchgang		Mittlere Durchgangszeit
20 Min. 26,3 Sek.		20 Min. 40,35 Sek.
20 „ 34,4 „		20 „ 40,30 „
20 „ 42,1 „		20 „ 40,40 „
20 „ 50,6 „	Mittel	20 Min. 40,35 Sek.
20 „ 58,2 „		18 „ 1,03 „
20 „ 6,5 „		2 Min. 45,32 Sek. = 165,32 : 20 = 8,266 Sek.

Für die Anzahl der Schwingungen, die zwischen die beiden mittleren Durchgangszeiten fallen, gibt der Quotient 165,32 : 8,24 = 20,05 einen Näherungswert; der richtige Wert ist 20, da eine ganze Zahl herauskommen muß. Mit dieser dividiert in den Zeitunterschied 165,32 gibt für die Schwingungsdauer den genauen Wert 8,266 Sek. Bei schnelleren Schwingungen lassen sich die Umkehrpunkte nach demselben Verfahren beobachten, indem man gegebenenfalls einen oder mehrere überspringt.

Kommt die Schwingungsdauer der Sekunde nahe, so wendet man das Verfahren der Koinzidenz an: es werden die Umkehrpunkte beobachtet, die mit einem Sekundenschlage zusammenfallen. Liegen n Sekunden zwischen zwei solchen Koinzidenzen, so ist die Schwingungsdauer gleich $n / (n \mp 1)$, je nachdem der beobachtete Körper langsamer oder schneller schwingt als das Uhrpendel.

Genauer als nach der Auge-und-Ohrmethode wird mit dem Chronographen beobachtet, womit der Eintritt eines Ereignisses von einem Beobachter oder automatisch auf elektrischem Wege registriert wird. Gewöhnlich dient dazu ein Papierstreifen, der von einem Uhrwerk wie bei dem Morseschen Telegraphen gleichmäßig an dem doppelten Schreiber vorbeibewegt wird; die eine Feder zeichnet die Beobachtungszeiten auf, die andere die Sekundenmarken, wozu das Uhrpendel selbsttätig einen Stromkreis schließt oder unterbricht, so daß sich die Zeit der Beobachtungsmarken nach den Abständen von den benachbarten Sekundenmarken genau ausmessen läßt.

Weniger genau als mit dem Chronographen, aber immerhin genauer als mit der gewöhnlichen Uhr mißt man eine Zeitdauer mit der Stechuhr. Der Zeiger dreht sich hier über einem Zifferblatt von dem Umfang einer Minute, die in Fünftel Sekunden geteilt ist. Durch den Druck auf einen Knopf wird er in Bewegung gesetzt, durch einen zweiten Druck angehalten und durch einen dritten auf Null zurückgebracht. Die Zeit zwischen den ersten beiden Drucken läßt sich also auf $^1/_5$ Sek. ablesen; ein kleiner Zeiger gibt die Minuten, die vollen Umläufe des großen, an.

Die Genauigkeit noch schnellerer Uhren (z. B. Hippscher Chrono-

nur durch selbsttätige elektrische Registrierung der zu beobachtender Ereignisse voll ausnutzen.

Ein bequemes Maß für kleine Zeiträume bildet die schreibende Stimm gabel, deren Schwingungsdauer sehr konstant ist und von der Temperatui wenig beeinflußt wird. Der an einer Zinke befestigte Schreibstift zeichnet auf einen sich drehenden und zugleich längs seiner Achse sich fortschie benden berußten Zylinder eine Schraubenlinie, auf welcher die Wellei der einzelnen Sinusschwingungen sich abheben und die Zeitunterschied der ebenfalls registrierten Ereignisse messen lassen. Für längere Beob achtungsreihen erregt man die Schwingungen durch einen Elektro magnet, der zwischen den Zinken angebracht wird, von dem die ein den Stromunterbrecher trägt.

Neuerdings erregt man eine Stimmgabel auch mit der Elektronenröhr (ECCLES 1919)[1]) Die Schaltung zeigt Fig. 30: die Zinken der Gabc schwingen in dem Felde eine permanenten Magnets, dessen Pol schuhe Spulen tragen, die in der Gitter- und Anodenkreis der Röhr liegen. Das Gitter G liegt an de Spule CF, die auf der anderei Seite mit der Glühkathode K ver bunden ist, während die Spule A zwischen Kathode und Anode geschaltet ist. In dem Augenblicl wo sich die Zinken von den Spule entfernen, induziert S eine EMK in der Spule CF, welche die Gitte spannung erhöht und den Strom verstärkt, der zur Anode fließt un in der Spule AC so gerichtet ist, daß er die Bewegung von N unterstütz

Fig. 30. Durch Elektronenrohr angeregte Stimmgabel.

Die Unveränderlichkeit der Schwingungen ist so groß, daß die Gab dazu dienen kann, den Gang von Normaluhren in stündlichen Abständ zu überwachen. Störend ist der Temperaturkoeffizient, der bei gewöh licher Gabel aus Eisen oder Stahl $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ beträgt. Doch läßt sich wo mit der Nickelstahllegierung Elinvar, die wegen der geringen Änderui ihrer Elastizität mit der Temperatur zu den Unruhen der Uhren benut wird, der Temperatureinfluß auf den zehnten Teil herabsetzen.

Kurze Zeiten mißt man nach HELMHOLTZ (1851) mit dem Pende unterbrecher, wo ein schweres Pendel, um 90° aus seiner Ruhelage a gelenkt, herabfällt und nacheinander zwei Kontakthebel trifft, dur welche Stromkreise geöffnet werden. Der Zeitunterschied für den ve

---

[1]) ... Nat. Phys. Labor. 18 175. 1924; D. ...

stellbaren Abstand a der Hebel, die man am Ort der Ruhelage, wo die Pendelgeschwindigkeit am größten ist, anbringt, läßt sich nach der linearen Geschwindigkeit schätzen, welche die Schlagstelle des Pendels besitzt und die in der Entfernung r von der Achse $2\pi r / T \cdot \sin 45^\circ$ beträgt, wenn T die Schwingungsdauer des Pendels bezeichnet. Der Apparat wird in verschiedenen Ausführungsformen[1]) hergestellt; bei der EDELMANNschen entspricht einer Vergrößerung des Hebelabstandes um 1 mm ein Zeitunterschied von 0,000 35 Sekunden.

Durch die Anwendung schnell laufender Elektromotoren, deren Drehzahl mit den gebräuchlichen Tachometern gemessen werden kann, ist der rotierende Spiegel ein gewöhnliches Laboratoriumsgerät geworden, mit dem die Zeit zwischen sehr rasch einander folgenden Vorgängen gemessen wird. Dreht sich z. B. der Spiegel 200 mal in der Sekunde, was nicht schwer mit einem solchen Apparat zu erreichen ist[2]), so durchläuft das Bild eines Gegenstandes, der 25 cm von der Spiegelachse entfernt ist, in derselben Zeit 400 mal einen Kreis von 50 cm Durchmesser; seine Geschwindigkeit ist also 60 000 cm/sec. Zwei Erscheinungen, z. B. die aufeinander folgenden Perioden einer Hochfrequenzschwingung, werden im Spiegel noch um 0,6 cm getrennt, wenn die eine 0,000 001 Sek. später eintritt als die andere. Ist allgemein die Umlaufzeit des Spiegels τ, die Entfernung der Bilder a, gemessen an einem um den Abstand A vom Spiegel entfernten Maßstab, so ist $t = \frac{1}{4\pi}\frac{a}{A}\tau$. Zur photographischen Aufnahme ersetzt man den Planspiegel besser durch einen Hohlspiegel, weil dann keine Linse gebraucht und das Licht mehr ausgenutzt wird.

Siebentes Kapitel.

Winkel.

Die Einheit des Winkels ist der Grad, der 360ste Teil des um einen Punkt liegenden vollen Winkels. Im Bogenmaß ist die Einheit derjenige Winkel, dessen Bogen gleich dem Halbmesser ist, also $360/2\pi = 57{,}29578^\circ = 3437{,}75' = 206\,265''$.

Zur Messung kleiner Winkel kann die Libelle dienen. Sie besteht aus einer Glasröhre, die mit Alkohol, Schwefeläther oder Petroläther (bei 40—50° destill.) bis auf eine kleine Luftblase gefüllt ist und zugeschmolzen

[1]) M. TH. EDELMANN, Ann. Phys. 3, 274. 1900; G. BORELIUS u. A. E. LINDH, ebd. 53, 97. 1917.

sein soll, damit der Inhalt nicht allmählich bei mangelhaft werdender Kittung verdunstet. Zum Schutze gegen Bruch und ungleichmäßige Erwärmung ist die Glasröhre von einem Messingrohr umgeben, so daß nur die obere Seite frei ist, welche die Teilung trägt und an der Innenseite schwach kreisförmig ausgeschliffen ist. Ist der Radius dieser Wölbung r und ein Intervall der Teilung l, so ist der Winkelausschlag $\varphi = l/r = 206265\, l/r''$. Für die Empfindlichkeit von 1″ muß r = 206 m sein, wenn Millimeterteilung gewählt wird. Vornehmlich benutzt man die Libelle zur Einstellung der horizontalen Richtung von Achsen oder Ebenen. Ändert die Blase ihre Lage, wenn das Instrument um 180° gedreht wird, so ist die eine Hälfte der Abweichung an der Libelle, die andere an der zu messenden Unterlage zu korrigieren Unter Umständen, wenn das Verfahren nicht sogleich zum Ziele führt, ist es zu wiederholen.

Der Winkelwert der Teilung wird mit sogenannten Libellenprüfern bestimmt, die man in der Weise improvisieren kann, daß man die Libelle auf ein Lineal od. dgl. setzt, das an dem einen Ende durch eine Mikrometerschraube zu heben ist. Dem Höhenunterschied von 0,1 mm auf 1 m entspricht ein Winkel von 20,6″. Nach einer solchen Bestimmung reicht die Libelle zur Winkelmessung so weit, wie der Ausschlag der Blase auf der Teilung abzulesen ist. Für größere Winkel muß das Instrument mit einem Anlegegoniometer verbunden werden, an dem sich die Winkel an einer Kreisteilung ablesen lassen, oder man verwendet einen Theodolit.

Mit diesem Instrument werden Winkel in einer horizontalen oder vertikalen Ebene, also Azimute und Höhen, gemessen. Zu diesem Zweck dreht sich das Fernrohr um eine horizontale Achse, die durch die Mitte des Höhenkreises geht, und das Ganze dreht sich um eine vertikale Achse, die in der Mitte des Azimutalkreises liegt. Dieser ist gewöhnlich verdeckt und nur an den Ablesestellen sichtbar; meistens kann er auch ohne das Fernrohr gedreht werden, so daß ein Winkel an verschiedenen Stellen des Kreises — mit Repetition — gemessen werden kann, was die Genauigkeit erhöht. Der Vertikalkreis besitzt diese Einrichtung oft nicht; dafür ist das Fernrohr zum Durchschlagen eingerichtet und kann durch Drehen des Azimutalkreises um 180° in die frühere Lage zurückgebracht werden.

Die Kreise werden mindestens an zwei um 180° versetzten Stellen abgelesen, damit die etwas veränderliche Exzentrizität der Achsen gegen die Teilung aufgehoben wird; man rechnet die Grade nach einer Stelle und nimmt das Mittel nur aus Minuten und Sekunden. Abgelesen wird mit Nonien bis auf etwa 1′ oder 0,5′ oder mit Mikroskopen, die Skalen in der Bildebene oder Schraubenmikrometer besitzen, welche eine Genauigkeit bis 0,2″ gewähren. Größere Instrumente haben ein Fernrohr

horizontale Drehachse abgelenkt, an deren Ende das Okular stets an derselben Stelle bleibt.

Zur Justierung der vertikalen Achse wird die auf dem Fernrohr sitzende Libelle der Verbindungslinie zweier Fußschrauben parallel gestellt. Nachdem diese berichtigt, dreht man die Libelle senkrecht zu dieser Richtung und wiederholt das Verfahren durch Drehen der dritten Fußschraube. Die Blase wird dann ihren Stand in jedem Azimut beibehalten.

Die optische Achse des Fernrohrs soll auf der Drehachse senkrecht stehen. Ob dieses der Fall ist, wird daran erkannt, daß man es nahezu in horizontaler Richtung auf eine entfernte Marke einstellt, es dann genau um 180° um die senkrechte Achse dreht und durchschlägt. Der Unterschied gegen die erste Einstellung, den man als Kollimationsfehler bezeichnet, ist zur Hälfte durch Verschiebung des Fadenkreuzes zu korrigieren. Zur Prüfung, ob die Fernrohrachse horizontal ist, stellt man auf verschiedene Stellen eines entfernten Schenkels ein.

Zur Ermittlung absoluter Höhen visiert man den Gegenstand an, dreht um 180° im Azimut, stellt nach Durchschlagen des Fernrohres wieder ein und zieht die erste Ablesung des Höhenkreises von der zweiten ab oder umgekehrt je nach der Richtung der Teilung. Die Hälfte des Unterschieds gibt die Zenitdistanz, die von 90° abgezogen die Höhe liefert.

Kleine Drehwinkel werden mit Spiegel und Skale gemessen (POGGENDORFF 1826): Man befestigt an dem sich drehenden Körper einen Spiegel ss, in dem mit dem Fernrohr das Bild einer entfernten Skale SS beobachtet wird (Fig. 31a). Dreht sich der Spiegel um den Winkel φ, so erfährt ein auffallender Lichtstrahl die doppelte Ablenkung, und entspricht dieser eine Verschiebung des Skalenbildes um a Skalenteile, so ist $\operatorname{tg} 2\varphi = a/A$, wo A die Entfernung des Spiegels von der Skale bedeutet. Hier zählt a von demjenigen Skalenteil, welcher bei der Ruhelage des bewegten Körpers am Fadenkreuz des Fernrohrs einsteht. Die Verbindungslinie dieser Skalenstelle mit dem Spiegel soll auf der Skale nahezu senkrecht stehen. Auf die Entfernung des Fernrohrs kommt es nicht an.

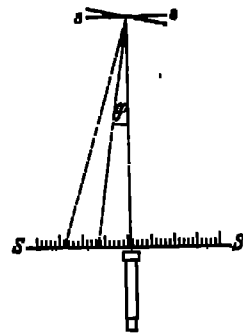



Fig. 31a. Spiegel und Skale.

Die Empfindlichkeit vieler Instrumente, die man mit Spiegel und Skale beobachtet, leidet, wenn man das drehende System mit einem zu großen Spiegel beschwert. Man sucht deshalb das Spiegelgewicht zu verkleinern. Für die Deutlichkeit des Bildes — ein gutes Fernrohr an-

genommen, dessen Größe nicht beschränkt ist — scheint es angemessen[1]), für jeden Millimeter des Spiegelhalbmessers nicht mehr als 1 Meter für die Skalenentfernung zu wählen.

Die Empfindlichkeit läßt sich dadurch verdoppeln, daß man das Licht, welches vom drehbaren Spiegel reflektiert ist, auf einen festen Spiegel lenkt und von dort nochmals nach dem drehbaren Spiegel leitet und dann beobachtet. In ähnlicher Weise[2]) wird z. B. bei dem Verfahren, die Biegung eines Stabes aus der Neigung seiner Enden zu bestimmen, an jedem Ende ein Spiegel angebracht und das Licht von der Skale über beide Spiegel s s′ in das Fernrohr gelenkt. Ist der Abstand der Skale von dem zuerst getroffenen Spiegel gleich A, die Entfernung beider Spiegel A′, so erhält man für den Ausschlag $\operatorname{tg}\varphi = \frac{a}{4A + 2A'}$

Fig. 31 b. Doppelspiegel und Skale.

Statt der Beobachtung mit dem Fernrohr kann man ein lineares Lichtbild, z. B. einen beleuchteten Spalt, einen geraden Glühlampenfaden, auf den Spiegel werfen und so eine bewegliche Lichtmarke auf der Skale erzeugen. Um die Linse zu sparen, wird dann statt des Planspiegels meistens ein Hohlspiegel verwandt.

Als Skalen werden auf Papier gedruckte Millimeterteilungen benutzt, die man auf Holzlatten klebt. Weil sie der Gefahr ausgesetzt sind, daß sie sich verziehen, so sind sie vor dem Gebrauch zu prüfen. Genauer sind Skalen aus Milchglas, die man von hinten beleuchten kann. Für den Abstand zwischen Spiegel und Skale kommt die optische Länge in Betracht; von der geometrischen ist deshalb abzuziehen $(n-1)\,d/n \sim \frac{1}{3} d$, wo d die Summe aller Glasdicken (Spiegel und Deckglas) und n den Brechungsindex des Glases bedeutet. Auch ist darauf zu achten, ob sich der Planspiegel nicht verzogen hat, weil dadurch die in Rechnung zu setzende Entfernung für einen Konkavspiegel zu vergrößern, für einen Konvexspiegel zu verkleinern ist.

Für kleine Ausschläge ist der Drehungswinkel der Skalenablenkung proportional. Es ist $\varphi = \sin\varphi = \operatorname{tg}\varphi = a/2A$ und in Winkelmaß: $\varphi = 1718{,}9/A$ Bogenminuten.

[1]) W. Volkmann, Phys. ZS. 30, 183 u. 223. 1911.

[2]) A. König. Wied. Ann. 28 108. 1886.

Größere Ausschläge bringt man auf eine dem Winkel, der Tangente, dem Sinus, dem Sinus des halben Winkels proportionale Größe, wenn, man $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{8}$ oder $\frac{11}{32} a^3/A^2$ von a abzieht, wie aus der Reihenentwicklung für diese Funktionen folgt.

Die Spiegelung des Lichtes wird auch benutzt, um Flächenwinkel zu messen. Das Verfahren, das in der Optik mit dem Spektrometer eine ausgedehnte Anwendung findet, soll hier nur an dem einfachen Goniometer von WOLLASTON (1809) erläutert werden, mit dem namentlich Kristallwinkel bestimmt werden. Diese werden an einem vertikalen Teilkreis D abgelesen, der um die horizontale Achse R drehbar ist (Fig. 32). Der Kristall sitzt, mit etwas Klebwachs befestigt, an dem NAUMANNschen Halter, der eine Bewegung um drei zueinander senkrechte Achsen erlaubt: die eine ist in der hohlen Achse R untergebracht und wird mit dem Knopf V gedreht, die zweite geht durch S, und die dritte fällt mit dem Träger von C zusammen. Mit diesen Achsen wird die Kante, in der zu messende Flächen zusammenstoßen, in die Verlängerung der Achse R gestellt. Eine entfernte horizontale Mire, z. B. ein Fensterkreuz oder eine Dachkante, wird in dem Spiegel M, der um eine horizontale Achse auf der Grundplatte drehbar ist, anvisiert, und mit ihrem Bild im Spiegel wird das Bild in einer Kristallfläche zur Deckung gebracht, wobei das Auge nahe an den Kristall gebracht ist. Darauf wird dieselbe Einstellung ohne Verschiebung des Auges mit der zweiten Fläche vorgenommen. Der Winkel, um den dazwischen der Teilkreis D mit der Scheibe T gedreht werden muß, ergänzt den Flächenwinkel zu 180° und kann bei einiger Sorgfalt in dieser Weise auf 1—2′ genau gemessen werden

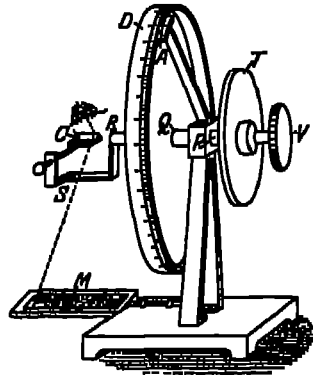



Fig. 32. Goniometer.

Bei der Drehung eines Körpers haben die außerhalb der Achse liegenden Punkte verschiedene lineare Geschwindigkeit v, welche dem Abstand r von der Achse proportional ist. Das Verhältnis $v/r = \omega$ heißt Winkelgeschwindigkeit; es ist der in der Sekunde durchlaufende Winkel und hat die Dimension sek^{-1}. Im allgemeinen wird die Winkelgeschwindigkeit durch die Drehzahl/Sekunde angegeben; es ist dann Drehzahl/Sekunde $= 2\pi$ CGS. Die Drehzahl wird mit Zählwerken oder mit Tachymetern bestimmt; die einen geben die mittlere Geschwindigkeit, die andern die augenblickliche an. Die letzten beruhen z. B. auf der Wirkung des durch eine Feder belasteten Zentrifugalregulators, einer Anordnung mit der

sich die Gleichmäßigkeit einer drehenden Bewegung auf $1 \cdot 10^{-4}$ erzielen läßt[3]).

Bei dieser tritt an die Stelle der Kraft und der Masse der fortschreitenden Bewegung das Drehmoment und das Trägheitsmoment Denn der Quotient aus Drehmoment und Trägheitsmoment ist gleich der Winkelbeschleunigung Die Einheit des Drehmoments erzeugt die Kraft von 1 Dyn, die an dem Hebelarm von 1 cm Länge angreift. Die Dimension ist Dyn · cm = $[cm^2 \cdot g \cdot sec^{-2}]$. Erzeugt ein Drehmoment M, das dem Winkel proportional ist, die Ablenkung φ, so heißt $M/\varphi = D$ die Direktionskraft des Systems.

Die Einheit des Trägheitsmoments, $J = [cm^2 \cdot g]$, wird dargestellt durch die Masse von 1 g, die 1 cm von der Drehungsachse entfernt ist.

Das Trägheitsmoment regelmäßiger homogener Körper läßt sich berechnen. So ist z. B. für einen Zylinder vom Halbmesser r, bezogen auf seine Achse, $J = \frac{1}{2} m\, r^2$ und für einen Hohlzylinder von den Radien r_1 und r_2, $J = \frac{1}{2}\, m\,(r_1^2 + r_2^2)$ und bezogen auf die zur Achse senkrechte Mittellinie bei der Länge l, $J = m \left\{ \frac{1}{12}\, l^2 + \frac{1}{4}\,(r_1^2 + r_2^2) \right\}$.

Ist das Trägheitsmoment J auf den Schwerpunkt bezogen, J′ aber auf eine dazu parallele Achse im Abstand a, so gilt $J' = J + m\, a^2$.

Schwingungsdauer T, Direktionskraft D und Trägheitsmoment J sind durch die Beziehung verbunden: $\frac{\pi^2}{T^2} = \frac{D}{J}$.

Wird T beobachtet und darauf J um einen nicht zu kleinen, bekannten Betrag J′ vermehrt, infolgedessen T auf T′ steigt, so ist $J : (J + J') = T^2 : T'^2$, woraus sich J berechnen läßt.

Handelt es sich z. B. um einen Zylinder, für den J zu bestimmen ist, so kann als Zusatz J′ das Trägheitsmoment eines aufgeschobenen Ringes benutzt werden oder zwei Massen, die symmetrisch zur Drehungsachse in Punkten des schwingenden Stabes aufgesetzt werden. Voraussetzung ist, daß sich die Massen mit dem Zylinder drehen[4]).

Achtes Kapitel.

Druck.

Die CGS-Einheit des Druckes, das Bar = Dyn/cm², ist wenig im Gebrauch. Meistens wird nach Quecksilberhöhen gerechnet, für welche als Einheit die normale Atmosphäre (Atm.), die Quecksilbersäule von 76 cm Höhe bei 0° und der normalen Schwere von 980,665 cm · sec⁻² gilt.

---

[3]) E. [illegible], ZS. f. Instr. 1909, 205.

Folgerichtiger wäre es, dem metrischen System entsprechend nach m Hg zu zählen, doch ist die Atmosphäre namentlich wegen ihrer mannigfachen Beziehungen zu der Temperaturskale die herrschende Einheit geblieben. Der Wert der normalen Schwere entspricht nicht vollständig dem heute von den Geodäten angenommenen von 980,62 für die Meereshöhe der Breite von 45°. Die Zahl 980,665 wurde 1901 von der 3. Conférence internationale des poids et mesures festgesetzt und ist später beibehalten worden.

In der Technik wird allgemein nach kg^*/cm^2 gemessen. Die Gewohnheit, diese Einheit auch als Atmosphäre zu bezeichnen, ist eine Quelle vieler Irrtümer. Für das Verhältnis der verschiedenen Einheiten bestehen die Beziehungen:

$$10^6 \cdot \text{Bar} = \text{Megabar} = 750{,}06 \text{ mm Quecksilber},$$
$$1 \text{ Atm.} = 1{,}013\,25 \text{ Megabar} = 1{,}033\,28 \text{ kg}^*/\text{cm}^2,$$
$$1 \text{ kg}^*/\text{cm}^2 = 735{,}52 \text{ mm Quecksilber},$$
$$1 \text{ m Quecksilber} = 1{,}333\,22 \text{ Megabar} = 1{,}359\,58 \text{ kg}^*/\text{cm}^2.$$

1. Flüssigkeitsmanometer.

Dem Druck, das ist die Kraft auf die Einheit der Fläche, kann man das Gleichgewicht halten durch die Schwere eines festen oder flüssigen Körpers, durch die Spannkraft eines Gases oder durch die Elastizität einer Feder; alle diese Mittel werden zur Messung von Drucken verwandt. Bequem sind die leicht herzustellenden Flüssigkeitsmanometer, mit denen man den Änderungen des Druckes stetig folgen kann. Zur Füllung wählt man je nach der Stärke des Druckes Quecksilber, Wasser oder für das letztere besser der günstigeren Kapillarität halber Petroleum oder Alkohol.

Eine Flüssigkeitssäule von der Höhe h und dem spezifischen Gewicht s übt durch ihre Schwere den Druck $hs\ g^*/cm^2 = hsg$ Bar aus, wo g die Beschleunigung der Schwere bedeutet. Da das spez. Gewicht der Flüssigkeit mit der Temperatur veränderlich ist, so sind die Beobachtungen bei wechselnder Temperatur auf eine mittlere oder auf 0° zu reduzieren; im letzten Falle sind die Längen von Quecksilbersäulen durch $(1 + 0{,}000\,182\,t)$ zu dividieren.

Weil Quecksilber das Glas nicht benetzt, ist es die ideale Manometerflüssigkeit, die im Laboratorium einerseits noch Drucke von wenigen Bar, andererseits von vielen Megabar zu messen gestattet, wenn passende Einrichtungen zur Messung so verschiedener Flüssigkeitshöhen zur Verfügung stehen.

Am verbreitetsten ist das Quecksilbermanometer als Barometer, mit

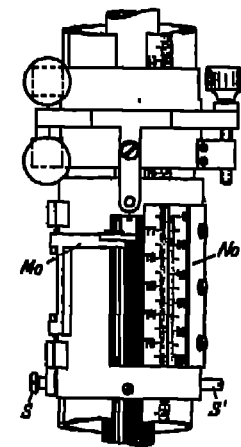
usw. darlegen lassen. Der zu messende Luftdruck wirkt bei dem Heberbarometer auf den einen Schenkel einer U-förmigen Quecksilbersäule, während der andere vom Vakuum „der Toricellischen Leere" begrenzt ist. Diese Form hat zum Zwecke einer genauen Bestimmung der Quecksilberhöhe und ihrer Temperatur mannigfache Ausbildungen erfahren, von denen sich die Wild-Fuesssche als sehr brauchbar erwiesen hat. Sie ist auf den deutschen meteorologischen Stationen als Normalinstrument eingeführt und bildet eine Vereinigung von Heber- und Gefäßbarometer (Fig. 33).

Die beiden Schenkel von 10—15 mm Weite, die senkrecht untereinander liegen, tauchen nämlich in ein eisernes Gefäß D, dessen Boden C ein Ledersack bildet, welchen man zum Heben des Quecksilbers in beiden Schenkeln durch die Schraube G einstülpen kann. Der lange Schenkel A weist in seinem unteren Teile einen kleinen Querschnitt auf und liegt dort an der Seite des kurzen, weiten Schenkels B, oberhalb dessen der Schenkel A in die Mitte gebogen und dann in den größeren Querschnitt übergeht. Die Erweiterung O, die sich an den kurzen Schenkel setzt, dient zur sicheren Lagerung des Ganzen in dem Messingrohr, das die Teilung trägt und als Wärmeschutz dient. Für die Messung hebt man zunächst das Quecksilber, bis die Kuppe im kurzen Schenkel das Visier N berührt, das dem Nullpunkt der Teilung entspricht, und stellt alsdann an der oberen Kuppe H mit der Schraube die Hülse ein, die den Nonius No und ein zweites Visier trägt. Soll das Barometer versetzt werden, so hebt man das Quecksilber durch die Schraube G so hoch, daß das Vakuum ganz ausgefüllt ist, und verschraubt die Öffnung des kurzen Schenkels B durch eine Kappe S. Wenn möglich, hängt man das Instrument in einem ungeheizten Zimmer auf und vermeidet

Fig. 33. Barometer.

noch immer in der Temperaturmessung liegt, wozu ein in das Messingrohr eingelassenes Thermometer dient.

Mit dem Visier kann man die Höhe der Quecksilberkuppe auf einige Hundertel Millimeter genau einstellen und die Teilung ebenso fein an dem Nonius ablesen. Genauer ist noch die Ablesung mit dem Mikroskop, die bei Manometern mannigfach in Gebrauch ist. Um mit dessen Faden sicher auf den Kuppenrand einstellen zu können, bringt man hinter dem Rohr ein Stück Pauspapier an, auf dem eine Reihe paralleler schräger, schwarzer Striche gezogen sind. Auf diesem Hintergrunde hebt sich der Kuppenrand gut ab (Röntgen 1873).

Auch die Einstellung auf eingeschmolzene Glasspitzen erweist sich als sehr brauchbar. Doch empfiehlt es sich für die äußerste Genauigkeit nicht, die Quecksilberkuppe mit einer solchen Spitze zur Berührung zu bringen, weil dabei störende elektrische Ladungen auftreten; man nähere vielmehr die Kuppe der Spitze auf eine kleine Entfernung und stelle auf die Mitte zwischen Spitze und ihrem Spiegelbild ein.

Zu beachten ist noch die Wirkung der Kapillarität. Um sie niedrig zu halten, wählt man weite Rohre — oberhalb 15 mm Weite ist die Kapillarkorrektion kleiner als 0,1 mm —, hält auf die Reinheit des Quecksilbers, damit sich die Kuppe immer gleichmäßig ausbilden kann, weshalb natürlich stets auch die beiden Schenkel eines Manometers von gleichem Querschnitt zu nehmen sind. Zuletzt vergesse man nicht, daß die Ablesegenauigkeit durch optische Verschiedenheiten in dem Glase der Manometerrohre verringert werden kann und suche dafür Glas aus, durch welches das Bild der Kuppe nicht verzerrt wird.

Kann man die Kapillardepression nicht in der angegebenen Weise vermeiden, so ist an dem abgelesenen Stande der Kuppe, deren oberer Rand einzustellen ist, eine Korrelation anzubringen, die in der folgenden Tabelle von Süring[1]) nach den Beobachtungen Schleiermachers und Delcros' angegeben ist. Es ist dieses z. B. der Fall bei dem Gefäßbarometer, wo die Quecksilbersäule einerseits durch den Spiegel des weiten Gefäßes, andererseits durch die Kuppe im Vakuum begrenzt wird. Man stellt die untere Quecksilberoberfläche gewöhnlich auf den Nullpunkt des Maßstabes ein, indem eine feste Spitze mit ihrem Spiegelbild zur Berührung gebracht wird.

Da das Gewicht eines an einer Wage aufgehängten Barometerrohres von der Höhe der gehobenen Quecksilbersäule abhängig ist, läßt sich der Luftdruck auch durch Wägung bestimmen. Ein solches Wagebarometer dient in der Regel dazu, die Änderungen des Luftdrucks fortlaufend

aufzuzeichnen, und bildet deshalb ein Hauptglied unter den Registrierinstrumenten einer Wetterwarte.

Kapillardepression des Quecksilbers für die Kuppenhöhe h (mm) und den Durchmesser d (mm).

d \ h	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
7	0,17	0,34	0,49	0,64	0,76	0,87	0,96	1,04	—
8	0,12	0,24	0,35	0,46	0,56	0,64	0,71	0,77	0,82
9	0,09	0,18	0,26	0,34	0,41	0,47	0,53	0,58	0,62
10	0,07	0,13	0,19	0,25	0,30	0,35	0,40	0,44	0,47
11	0,05	0,10	0,14	0,19	0,23	0,27	0,30	0,33	0,36
12	0,04	0,07	0,11	0,14	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
13	0,03	0,06	0,09	0,11	0,14	0,16	0,18	0,20	0,21
14	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15	0,16

Zur Messung sehr geringer Quecksilberhöhen bedient man sich besonderer Anordnungen. Die eine verkörpert das von RAYLEIGH (1901)

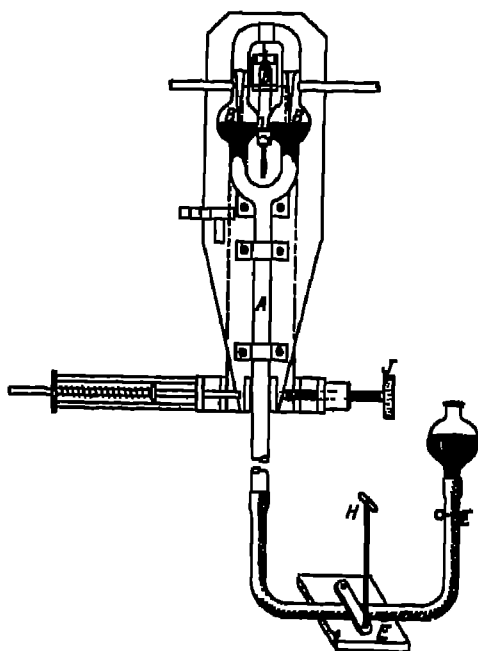



Fig. 34. Kippmanometer.

Fig. 35. Manometer mit gespiegelten Teilstrichen.

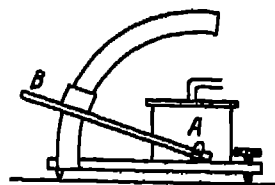



Fig. 36. Mikromanometer

angegebene Kippmanometer[1]) (Fig. 34). Die Quecksilberkuppen BB auf welche die zu vergleichenden Drucke wirken, befinden sich in de Mitten zweier Glaskugeln von etwa 25 mm Weite, und zwar jede eine

Glasspitze gegenüber. Die Zuleitungen der beiden Kugeln münden in einen gemeinsamen Stil A, so daß beide Quecksilberoberflächen durch den Druck der Schlauchklemme E H gehoben werden können. Der Druckunterschied zwischen beiden Gefäßen wird durch die Neigung gemessen, in welche die Verbindungslinie durch die Schraube J eingestellt werden muß, damit beide Spitzen den Quecksilberoberflächen gleich nahe stehen; eine Berührung ist, wie schon erwähnt, zu vermeiden. Man stellt deshalb mit dem Mikroskop stets dieselbe kleine Entfernung ein, was erleichtert wird, wenn man die Bilder beider Spitzen in demselben Instrument beobachtet. Die Neigung des Systems, das sich um die Schneide S dreht, wird mit Spiegel und Skale gemessen.

Thiesen und Scheel[3]) benutzten eine andere Vorrichtung (Fig. 35) zur Messung kleiner Drucke: Das Quecksilber befindet sich in einer Zwillingskammer, deren Teile so weit sind, daß die Flüssigkeitsoberflächen, über deren einer der zu messende Druck und über deren anderer das Vakuum herrscht, eben sind. Die Hinterwand wird von einer ebenen Glasplatte gebildet, welche eine Skale mit durchgehenden horizontalen Strichen trägt. Man bestimmt durch die planparallele Vorderplatte mit einem Mikroskop den Höhenunterschied der Kuppen aus dem Abstand eines Striches von seinem Spiegelbilde. Eine Kontrolle gewährt die Vertauschung von Druck- und Vakuumkammer.

Als Mikromanometer (Fig. 36) werden Instrumente bezeichnet, die mit Wasser oder Petroleum gefüllt zur Messung kleiner Drucke dienen. Auf der einen Seite wirkt der zu messende Druck auf ein weites Gefäß A, auf der andern die Atmosphäre auf einen engen Glasschenkel B, der in seiner Neigung verstellt werden kann. Dadurch läßt sich die Empfindlichkeit in weiten Grenzen ändern[4]).

Ein empfindliches Nullinstrument ist die Drucklibelle (A. Töpler 1895), bei der die zu vergleichenden Drucke auf einen kurzen Flüssigkeitsfaden wirken, welcher sich in dem Knie einer schwach gebogenen Glasröhre befindet. Setzt man die Libelle auf eine Unterlage, deren Neigung sich durch eine Fußschraube ändern läßt, so kann man auch einem Überdruck p das Gleichgewicht halten. Es ist $p = s\,l \sin \alpha$, wo l den Abstand der Kuppen und α den Neigungswinkel bedeutet (Fig. 37).

Fig. 37. Drucklibelle.

Für lange Quecksilbermanometer benutzt man zweckmäßig ein Stahlrohr, das an der Hauswand durch mehrere Stockwerke emporgeführt wird. In Zwischenräumen ist es durch verschließbare Anstiche unter-

[illegible]

brochen, durch welche das Quecksilber in eine Reihe übereinander angeordneter Glasrohre eingelassen werden kann, in denen die Kuppe sichtbar ist. Steigt der Druck so hoch, daß die Flüssigkeit in einem Glasrohr überzufließen droht, so wird dieses abgesperrt und das nächste geöffnet.

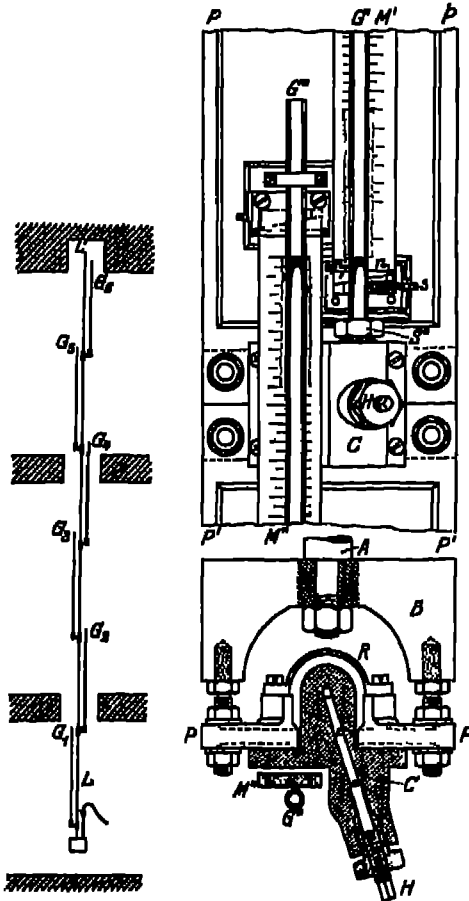
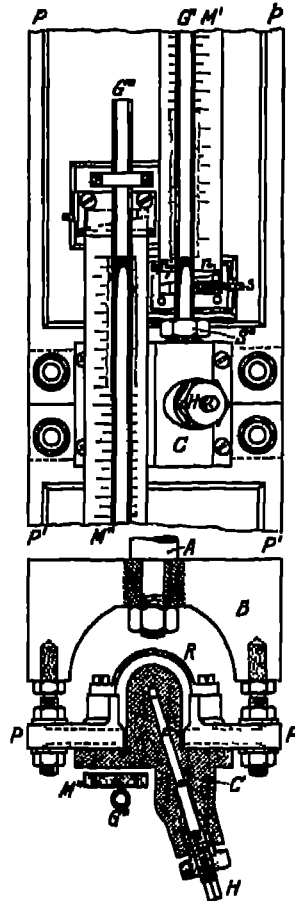
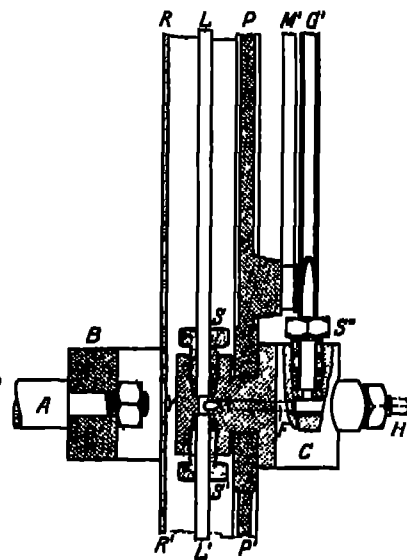



Fig. 38 stellt das Manometer der P.-T. Reichsanstalt, das sich durch 3 Stockwerke erstreckt, schematisch dar, G_1 G_2 ... sind die 2 m langen Glasrohre, die sich an das Stahlrohr L L′ ansetzen. Fig. 39 u. 40 zeigen die Konstruktion der Hauptteile. P bezeichnet den Träger der Glasskalen M, der mittels der eisernen

Fig. 38. Fig. 39. Fig. 40.
Langes Quecksilbermanometer.

Halbringe B und der Steinschrauben A an der Wand befestigt ist; R ist ein Schutzrohr, welches das Stahlrohr L L′ gegen schnelle Temperaturänderungen schützen soll; der Anstich F wird durch das Kegelventil H geschlossen.

Damit die Genauigkeit von 0,1 mm, mit der sich die Quecksilberhöhen ablesen lassen, voll ausgenutzt werden kann, wird die Temperatur des

gemessen, dessen Draht isoliert an das Rohr der ganzen Länge nach angebunden ist. Je nach dem zu messenden Druck können passende Strecken durch die Auswechselung verschiedener Potentialleitungen abgegriffen werden[5]).

Wo das Manometer nicht über Zimmerhöhe hinausgeführt werden soll, zerlegt man es in parallele Stücke von etwa 3 m und verbindet diese durch Leitungen, die im Zickzack von dem oberen Ende des ersten Stücks zum unteren des zweiten usw. laufen und den Druck übertragen[6]) Diese Verbindungen werden mit Wasser oder Luft gefüllt, und das Gewicht ihres Inhalts ist von dem der Quecksilbersäule abzuziehen. Die Anordnung hat den Nachteil, daß der Quecksilberstand in vielen Rohren abgelesen werden muß, was viel Zeit beansprucht.

Im Kältelaboratorium zu Leiden[7]) ist ein solches Instrument für 60 Atm. an der Zimmerwand angebracht, bei kleinen Instrumenten bis 20 Atm. ordnet man die Rohre wohl auf einem tragbaren Gestell in einem Kreisabschnitt an, so daß sie bequem von einer Stelle mit dem Kathetometer abzulesen sind.

2. Druckwage.

Sehr lange Quecksilbermanometer, wie sie früher an Türmen, in Schächten von Bergwerken oder in tiefen Brunnen angebracht wurden, baut man heute nicht mehr, sondern verwendet statt dessen Druckwagen (Kolbenmanometer). Bei diesen wirkt der zu messende Druck auf einen Kolben, der sich in senkrechter Richtung in einem Zylinder bewegt und so lange gegen den von unten wirkenden Druck mit Gewichten belastet wird, bis er ins Gleichgewicht kommt. Für die Empfindlichkeit der Instrumente ist ausschlaggebend, daß der Kolben einerseits frei und ungehemmt durch Dichtungen in dem Zylinder spielt (AMAGAT 1892), andererseits um seine Achse ständig gedreht wird, und zwar soll diese Drehung nicht in demselben Sinne erfolgen, sondern hin und her pendelnd um einen Winkel von etwa 40°. Hierzu kann ein Mitnehmer, der auf den Kolben wirkt, von Hand bewegt werden; bequemer und für die Messung sicherer ist jedoch die Verwendung eines kleinen Elektromotors für diesen Zweck. Der Druckraum wird gedichtet durch ein zähes Öl, z. B. Rizinusöl, das an dem Kolben vorbeigepreßt wird und langsam ausfließt; mit einer kleinen Handpresse ist es von Zeit zu Zeit zu ergänzen.

Die Formen der Druckwage sind mannigfaltig. Die Belastung kann unmittelbar oder, um an Gewichten zu sparen, mittels eines ungleich-

---

[5]) L. HOLBORN u. F. HENNING, Ann. Phys. 26, 833. 1908.

[6]) M. THIESSEN, ZS. f. Instr. 1881, 114.

armigen Hebels auf den Kolben wirken. Ferner wird der Druck oft auf einen zweiten Kolben von größerem Querschnitt übertragen und hier-

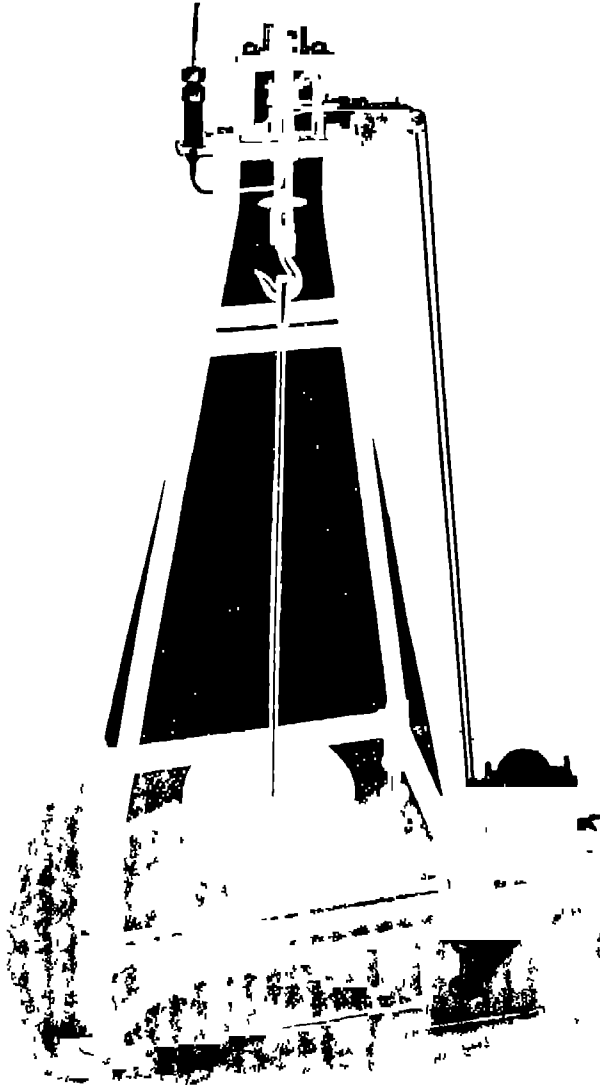



Fig. 41. Druckwage.

durch so weit herabgesetzt, daß er sich mit einem Quecksilbermanometer von mäßiger Höhe messen läßt. Wir beschränken uns auf die Beschreibung der einfachsten Anordnung, wo die Gewichte unmittelbar den Kolben belasten.

Fig. 41 stellt den ganzen Aufbau einer Druckwage dar, die mit einem Stempel von 0,2 cm² Querschnitt versehen für Drucke bis 1000 Atm. bestimmt ist, während Fig. 42 den Hauptteil eines andern Instruments mit einem Kolben von 1 cm² Querschnitt zeigt, das bis 250 Atm. reicht[3]) Der Stempel b wird ständig mittels eines Mitnehmers, der die vertikale Bewegung nicht hindert, in dem Zylinder a hin und her gedreht. Den

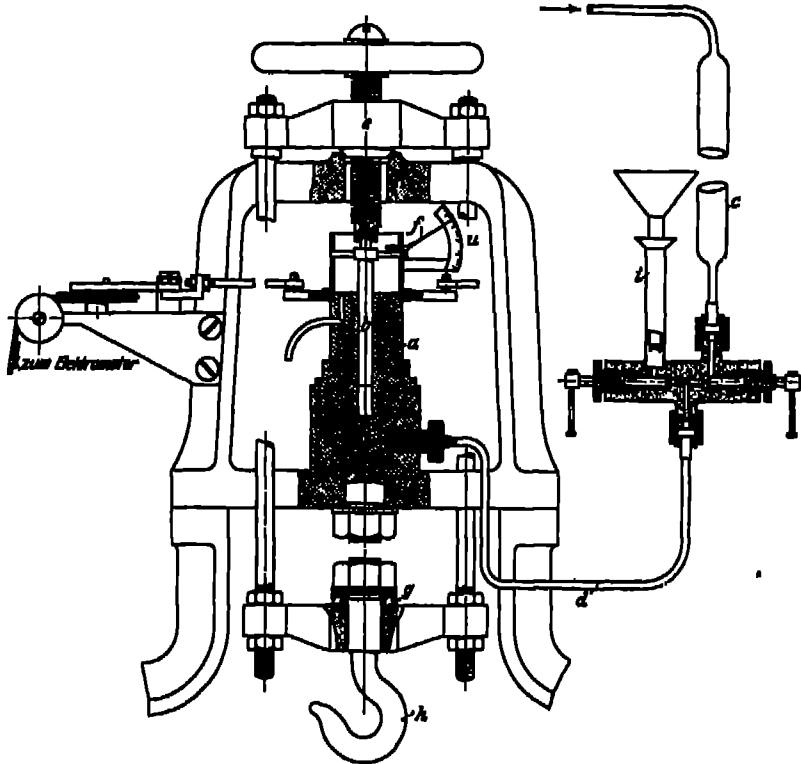



Fig. 42. Druckwage.

Stand überträgt der ungleicharmige Hebel f auf die Skale u, wodurch jede Verrückung 15fach vergrößert erscheint. Gewichte bis 250 kg hängen an dem Haken h und werden mit dem Gehänge e auf den Kolben gesetzt. Bei g ist ein Kugelgelenk in den Träger eingefügt, so daß die Gewichte an der Drehung des Kolbens nicht teilnehmen. Der Behälter C, auf welchen der zu messende Druck wirkt, und die Leitung enthalten Rizinusöl, das nach Bedarf durch die Pumpe i ergänzt werden kann.

Bis 100 Atm. macht sich noch die Änderung des Gewichts um 1 g an dem Kolben bemerkbar. Man ändert dieses so lange, bis der Kolben in

vertikaler Richtung stillsteht. Die volle Genauigkeit des Instruments läßt sich natürlich nur bei konstanten oder langsam sich ändernden Drucken ausnutzen.

Kommt der Kolben vom Querschnitt F cm^2 bei der Belastung mit dem Gewicht m kg unter der Wirkung des Drucks p zur Ruhe, so ist p = m/F kg^*/cm^2. Der wirksame Querschnitt ist das Mittel aus den Querschnitten von Stempel und Zylinder. Den ersten kann man durch lineare Ausmessung des Durchmessers, den andern durch Auswägung mit Quecksilber bestimmen. Damit erreicht man jedoch nur einen angenäherten Wert, welcher der großen Genauigkeit von einigen Zehntausendsteln, welche die Messungen mit der Druckwage aufweisen, nicht gleichkommt. Deshalb ist es vorzuziehen, die Druckwage mit einem Quecksilbermanometer bei einem Druck von etwa 15 Atm zu vergleichen und daraus den wirksamen Querschnitt zu berechnen. Wegen der Unvollkommenheiten der Gestalt wechselt dieser etwas mit der Kolbenstellung in dem Zylinder; man hält deshalb stets dieselbe Zeigeranzeige auf der Skale u ein

Die Bestimmung des wirksamen Querschnitts bei höheren Drucken setzt eine zweite Druckwage (oder sonst ein Manometer von gleicher Empfindlichkeit) und ein großes Differential-Quecksilbermanometer voraus. Nachdem auch die zweite Druckwage bei dem Anfangsdruck von 15 Atm. geeicht worden ist, wird ein Druck von etwa 30 Atm. gleichzeitig einerseits mit Wage I, andererseits mit Wage II und Differentialmanometer in Reihenschaltung gemessen. Daraus ergibt sich der wirksame Querschnitt für 30 Atm., und nachdem dieser dann durch eine Vergleichung beider Wagen bei diesem Druck auch für die Wage II bestimmt wurde, geht man zu einem Druck von 45 Atm. über usw.[9]).

Innerhalb der Druckgrenze bis 200 Atm. überschreiten die Änderungen des wirksamen Querschnitts nicht die Fehlergrenze, wie auch die Berechnung der elastischen Deformationen ergibt, welche Zylinderbohrung und Stempelquerschnitt der gebräuchlichen Formen erleiden. Die Verhältnisse liegen auch für höhere Drucke günstig, da sich die Zylinderbohrung weitet und der Stempelquerschnitt verjüngt, der Spalt also wohl größer wird, die beiden Deformationen die Änderung des wirksamen Querschnitts aber entgegengesetzt beeinflussen. Für die spez. Dehnung ε des Durchmessers eines Zylinders vom äußeren und inneren Radius r_a und r_i gilt die Gleichung: $\varepsilon_a = \frac{p}{E} \frac{(1+\mu) r_a^2 + (1-\mu) r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} = \frac{p}{E} K.$

Für die Druckwage wählt man schon der Festigkeit wegen die Wandstärke des Zylinders so, daß K seinem Grenzwert 1,3, für den $r_i/r_a = 0$

nahe kommt; E bedeutet den Elastizitätsmodul und μ die Poissonsche Zahl (für Stahl also $E = 2 \cdot 10^6$ kg/cm² und $\mu = 0{,}28$). Da der Druck längs des Stempels bis auf Null abfällt, so stellt die Formel für die Wage nur eine obere Grenze dar. Für die Deformation ε_2 des Stempeldurchmessers, der durch den Druck der Gewichte G eine Querausdehnung und unter dem Flüssigkeitsdruck eine Zusammenziehung erfährt, erhält man als Grenze:

$$e_2 = \frac{\mu}{E}\,\frac{G}{r_1^2\pi} - \frac{p}{E}(1-\mu) = -\frac{p}{E}(1-2\mu),$$

und damit für die Änderung des wirksamen Querschnitts

$$\frac{1}{2}(e_1 + e_2) = \frac{1}{2}\,\frac{p}{E}(K - 0{,}4) = \frac{1}{2}\,45\,p \cdot 10^{-8}$$

und für die an den Angaben der Wage anzubringende Korrektion c:

$$c = -45\,p^2 \cdot 10^{-8};$$

diese würde also für $p = 1000$ Atm. nicht $1/2$ ‰ überschreiten[10]).

Für solch hohe Drucke pflegt man Stempel von kleinem Querschnitt und Öl von großer Zähigkeit zu wählen, damit sein Ausfluß nicht zu reichlich wird. AMAGAT benutzte zum Dichten Zuckermelasse und kam bis 3 000 Atm.; BRIDGMAN gelangte mit einem Stempel von 0,02 cm² Querschnitt bis 13 000 Atm., für 8000 Atm. gibt er eine Empfindlichkeit von 0,1‰ an. Um den Ölausfluß einzuschränken, setzte er den Zylinder unter denselben Außen- und Innendruck[11]).

Es ist natürlich, daß so hohe Beanspruchungen einen besonderen Stahl von großer Festigkeit verlangen. Man hat deshalb wohl bei technischen Instrumenten Differentialkolben angewandt. Der Druck wird hier seitlich dem Kolben zugeleitet; sein oberer Querschnitt ist größer als der untere, und die angehängten Gewichte halten dem Druck auf die Differenz der Querschnitte das Gleichgewicht, so daß man die absoluten Abmessungen beliebig stark wählen kann. Dem größeren Stempelumfang entsprechend ist natürlich der Ölausfluß größer oder die Empfindlichkeit bei kleinen Drucken geringer, wenn der Stempel strammer gepaßt ist.

3. Gasmanometer.

Das Gasmanometer ist kein bequemes Instrument, wird aber oft in physikalischen Laboratorien zur Messung hoher Drucke benutzt. Eine Gasmenge, die bei bekannter Temperatur und bekanntem Druck in einer Glasröhre abgeschlossen ist, wird durch den Druck mittels Quecksilbers auf ein geringeres Volumen zusammengedrängt, das an einer Teilung

---

[10]) L. HOLBORN, Ann. Phys. 54, 503. 1917.

nach vorhergegangener Kalibrierung abzulesen ist. Die Empfindlichk nimmt mit steigendem Druck ab, und das Gas ist bald in einer Kapilla zusammengedrängt, in welche das Gefäß mündet. Statt der Teilung l nutzt man auch elektrische Kontakte, die Signale ermöglich wenn das Quecksilber herantritt. Dieses füllt einen druckfest eisernen Zylinder aus und umgibt die Glasröhre in ihrem weit Teil auch von außen, damit sie vor der Gefahr des Bruc geschützt ist (Fig. 43)[12]).

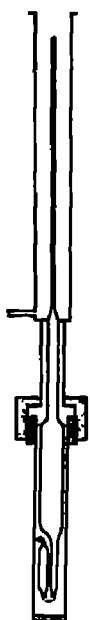



Fig. 43. Gasmanometer.

Die Einstellung wird von der Temperatur stark beeinflu weshalb diese durch ein Flüssigkeitsbad konstant gehalt werden muß; ferner ist die Abweichung des Gases von d BOYLE-MARIOTTEschen Gesetz — man wählt zweckmäßig Stic stoff oder Wasserstoff — zu berücksichtigen. Für das let Gas wächst der pv-Wert bei 20° anfangs linear mit dem Dru und zwar von 1 bis 100 Atm. um 6%.

4. Widerstandsmanometer.

Für die Messung der höchsten Drucke, wobei BRIDGMAN 20 000 Atm. gelangt ist, wird das elektrische Manometer benut das auf der Änderung des Widerstandes eines Manganindrah beruht (LISELL 1898). Der Widerstand steigt im Gegens zu dem reiner Metalle mit dem Druck linear an, und zwar $2 \cdot 10^{-6}$/Atm., wie sich aus der Vergleichung mit der Dru wage bis 10 000 Atm. ergab, von wo an extrapoliert wur Der Draht wird ohne Unterlage bifilar zu einem kleinen R aufgewickelt, den man in eine isolierende Flüssigkeit, wie Gasolin o Kerosin, taucht, die selbst bei dem stärksten Druck nicht erstarren. I Verfahren verlangt eine empfindliche Widerstandsmessung und tr des geringen Temperaturkoeffizienten von Manganin eine sehr k stante Temperatur[13]).

5. Federmanometer.

Bei den Federmanometern wirkt der Druck gewöhnlich auf das Inr einer elastischen Röhre (BOURDON) aus Stahl oder Messing von elli schem Querschnitt, die zu drei oder zwei Viertel eines Kreises gebogen und sucht sie zu strecken (Fig. 44). Die Bewegung wird durch einen Zahnsegment versehenen Winkelhebel auf eine Achse übertragen, welcher ein Zeiger sitzt, der über einer Skale spielt; sie gibt meisten kg*/cm² Überdrucke über 1 Atm. an und wird durch Vergleichung einer Druckwage oder einem Quecksilbermanometer festgelegt.

---

12) H. KAMERLINGH ONNES, Comm. Leiden Nr. 50. 1899.

Für die Messung kleinerer Drucke (bis etwa 30 Atm) wendet man wohl ıch eine andere Bauart an, bei der eine elastische Platte auf Biegung eansprucht wird. Diese Deformation wird dann in ähnlicher Weise ie bei der Röhre auf einen Zeiger übertragen (Fig. 45)[14].

Instrumente, welche das Quecksilberbarometer ersetzen sollen, die ɔgenannten Aneroidbarometer (VIDIE 1847), besitzen elastische Platten .ıs gewelltem harten Neusilberblech, welche den Deckel oder Boden und 'eckel einer luftleer gemachten runden Dose bilden. Da sie auf Reisen nd in Flugzeugen zur Bestimmung der Höhe aus dem Luftdruck dienen, ɔ weist ihre Skale vielfach auch eine Höhenteilung auf.

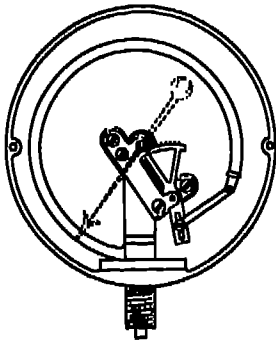



Fig. 44. Röhrenmanometer.

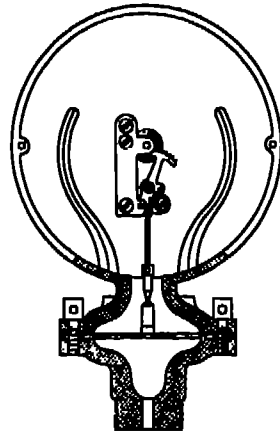



Fig. 45. Plattenmanometer.

Die Federmanometer sind einem Temperatureinfluß unterworfen, der twa $2 \cdot 10^{-4}$/Grad beträgt. Unbequem ist es, daß ihre Angaben infolge der lastischen Nachwirkung von der Vorgeschichte abhängen: die Zeigerinstellungen, als Funktion des Drucks aufgetragen, bilden bei steigendem nd fallendem Druck eine Schleife. Um deren Breite klein zu halten, eschränkt man sich auf schwache elastische Deformationen der Röhre oder 'latte und vergrößert die Zeigerbewegung durch die Übertragungsvorichtung[15]). Im Laboratorium benutzt man deshalb statt des Zeigers ielfach die Beobachtung mit Spiegel und Skale, so besonders in denenigen Fällen, wo eine Membran aus Glas oder Quarzglas wegen ihrer Beständigkeit gegenüber Säuredämpfen, Temperatur usw. einer Metallılatte vorgezogen wird. Für die Beobachtung sehr kleiner Durchbieungen von Metallplatten ist auch die Verschiebung von FIZEAUschen

[14]) J. WOHLFAHRT, ZS. f. techn. Phys. 1924, 362.

Interferenzstreifen gemessen worden. Mit einer solchen Vorrichtung wurden Druckänderungen bis zur Größenordnung von 0,1 μ Quecksilber verfolgt[16]).

6. Messung kleiner Drucke.

Die Beobachtung sehr kleiner Drucke, wie sie die Technik des Hochvakuums, z. B. bei der Herstellung der Glühlampen, der Röntgen- und Verstärkerröhren, verlangt, erfordert besondere Hilfsmittel. Die häufigste Anwendung findet hier das Kompressionsmanometer (ARAGO, meist aber nach MC LEOD benannt), das bis etwa $5 \cdot 10^{-6}$ mm Quecksilber brauchbar ist. Man drückt durch Heben des mit Quecksilber gefüllten Gefäßes das Gas, dessen Druck p zu messen ist, aus dem Raume v in den kapillaren Ansatz v'. Kommt es dann auf einen Druck p', der sich aus dem Höhenunterschied der Kuppen in v' und dem Nebenrohr ergibt, so ist der gesuchte Druck $p = p' v' / v$; v und v' sind vor der Zusammensetzung der Vorrichtung durch Auswägen und Kalibrieren zu bestimmen. Das Verfahren setzt voraus, daß das Gas keinen Wasserdampf oder sonstige kondensierbare Bestandteile enthält; sie sind durch Phosphorpentoxyd und eine mit flüssiger Luft gekühlte Falle abzuscheiden. Unter Beachtung dieser Maßnahme haben verschiedene Beobachter für mehrere Gase die Gültigkeit des BOYLE-MARIOTTEschen Gesetzes mit dem Kompressionsmanometer bis zu sehr geringen Drucken untersucht und bestätigt. Nur bei Sauerstoff wurden Abweichungen beobachtet, deren Ursache jedoch sekundärer Natur war und auf der Oxydation des Quecksilbers beruhte.

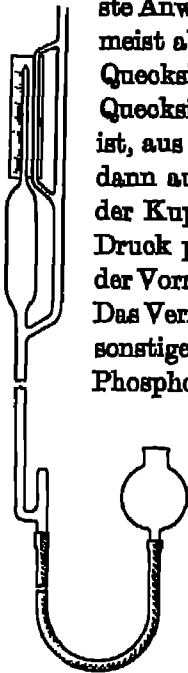



Fig. 46. Kompressionsmanometer.

Bei niedrigen Drucken, wo die freie Weglänge der Gasmoleküle von derselben Größenordnung ist wie die Abmessungen der sie umschließenden Gefäßwände, ist die Reibung und Wärmeleitung der Gase nicht mehr unabhängig vom Druck, sondern nimmt umgekehrt proportional damit ab. Auf dieser Tatsache beruhen die folgenden Instrumente, deren Angaben durch die Natur der anwesenden Gase und Dämpfe beeinflußt werden. Die Eichung muß deshalb für jede Anwendungsart besonders ausgeführt werden.

Ein einfaches Mittel bildet der schwingende Quarzfaden, den LANGMUIR (1901) benutzte, um den Druck in der Glocke einer Glühlampe zu verfolgen. Ein solcher Faden von etwa 8 cm Länge und 0,05 bis 0,4 mm

Dicke wird unter Anwendung von Schmelzglas in die Glasglocke eingeschmolzen. Durch sanfte Erschütterungen wird er in Schwingungen versetzt und deren Dämpfung beobachtet. Bezeichnet ϑ die Halbwertzeit, in der die Amplitude der Schwingung auf die Hälfte ihres Anfangswerts zurückgeht, so ist[17]: $\vartheta = \frac{a}{p\sqrt{M} + b}$, wo M das Molekulargewicht des Gases, p seinen Druck in mm Quecksilber bezeichnet, die Konstante a von der Dicke und die Konstante b von der Elastizität des Fadens abhängt. Man beobachtet den Faden mit dem Fernrohr, indem man ihn von der Seite durch eine Lampe beleuchtet. Es genügt die Eichung bei zwei Drucken, die man mit dem Kompressionsmanometer bestimmt; als den einen kann man auch ein gutes Vakuum wählen, wofür $\vartheta = a/b$. Die Anordnung ist abwärts bis zu Drucken von 0,05 μ Quecksilber brauchbar.

Ein zweites von LANGMUIR angegebenes Instrument beruht ebenfalls auf der Gasreibung. In einer Glasglocke hängt an einem Quarzfaden eine dünne Glimmerscheibe von 3 cm Durchmesser, unterhalb deren sich eine Aluminiumscheibe dreht. Die Ablenkung der Glimmerscheibe, welche durch die andere mitgenommen wird, beobachtet man mit Spiegel und Skale; sie ist proportional der Drehgeschwindigkeit und dem Produkt $p\sqrt{M}$. Die Aluminiumscheibe ist mit einem Magnet verbunden, der mittels eines Drehfeldes in einem außerhalb des Glasgefäßes angebrachten Grammeschen Ring bewegt wird. Unterhalb $5 \cdot 10^{-4}$ Bar machten sich die Wirkung der Wirbelströme auf die Spiegelfassung und die Schwingungen der Glimmerplatte störend bemerkbar[18]).

Die Änderung der Wärmeleitung mit dem Druck kann man in der Weise zu dessen Bestimmung verwenden, daß man ein Thermoelement in dem zu messenden Druckraum anbringt und einer konstanten Strahlungsquelle, z. B. einer mit konstantem Strom brennenden Glühlampe, aussetzt[19]). Oberhalb 0,1 mm Quecksilber ändert sich die Thermokraft nicht, unterhalb bis 0,001 mm nimmt sie umgekehrt proportional log p zu und erreicht ein Maximum, das bei weiterem Auspumpen bestehen bleibt.

Die Radiometerwirkung wurde von CROOKES (1873) entdeckt, jedoch erst von KNUDSEN (1910) erklärt. Bei der bekannten „Lichtmühle" von CROOKES bewegt sich in einem evakuierten Glasgefäß auf einer Spitze ein Aluminiumkreuz, dessen Arme senkrechte dünne Glimmerfolien tragen,

17) F. HABER u. F. KERSCHBAUM, ZS. f. Elch. 1914, 296.
18) S. DUSHMAN, Phys. Rev. 5, 212. 1915.

deren eine Seite geschwärzt ist. Wird das Instrument bestrahlt, so dre sich das Kreuz bei einem bestimmten Vakuum in einem Sinne, als ob c geschwärzten Seiten von den Strahlen abgestoß werden. Wird der Druck weiter herabgesetzt, so ste das Kreuz still. Die Erscheinung erklärt sich darau daß die schwarzen Flächen durch Absorption d Strahlung heißer werden und den von ihnen abpralle den Gasmolekülen eine höhere Temperatur verleih als die hellen, wodurch das Kreuz ein Drehmome erhält. KNUDSEN gab ein Radiometer an, das als a solutes Manometer dienen kann. In einem Gase v kleinem Druck seien zwei Platten A von der al Temperatur T_A, die rahmenförmig vereinigt sind, einem Faden aufgehängt gegenüber zwei fest Platten B, die z. B. durch elektrische Heizung a höherer Temperatur T_B gehalten werden (Fig. 4 Sind A und B nicht weiter voneinander entfernt . die freie Weglänge der Gasmoleküle und werden die parallelen Fläch voneinander abgestoßen mit einer Kraft K/cm², so ist:

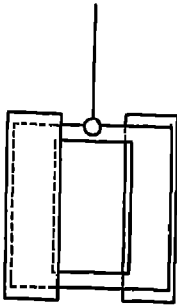



Fig. 47. Radiometer von KUNDSEN.

$$p = \frac{2K}{\sqrt{T_B / T_A} - 1} = 4K \frac{T_A}{T_B - T},$$

wenn die Temperaturdifferenz klein ist. Die Kraft w durch die Torsion des Aufhängefadens mit Spiegel u Skale gemessen[20]).

Dieser Gedanke liegt verschiedenen Ausführungsforn zugrunde, von denen die RIEGGERsche[21]) beschriel werden möge, welche für Zeigerablesung eingerichtet i Die bewegliche runde Aluminiumscheibe, die an ein Wolframfaden hängt, ist vielfach radial eingeschnitt und die einzelnen Sektoren sind um 45° aus der Eb herausgebogen, so daß ein Flügelrad entsteht, oberh dessen ein 7 mm breites Metallband durch Zuleitung von oben elektrisch geheizt wird. Das Aluminiumrad tr eine zylinderförmige Skale, deren Drehung gegen e Marke auf der Gefäßwand beobachtet wird. Da sich Abstand zwischen Drehkörper und Heizband nicht änd so ist das Drehmoment konstant und die Skale linear für eine gewi Heiztemperatur, so daß man selbst mehrere ganze Umdrehungen

Fig. 48. Radiometer von RIEGGER.

[20]) M. KNUDSEN, Ann. Phys. 32, 809. 1910.

nutzen kann. Ein Elektromagnet mit zahlreichen radialen Polschuhen dient zur Dämpfung (Fig. 48).

Gemessen wird entweder der stationäre Ausschlag unter Einschaltung der Dämpfung oder der ungedämpfte ballistische, nachdem mit der Dämpfung die Ruhelage hergestellt worden ist. Da diese Schwankungen unterliegt, so ist das ballistische Verfahren nicht allein empfindlicher, sondern auch zuverlässiger Die Empfindlichkeit ist am größten bei einem Druck von etwa 0,01 mm Quecksilber und bei größeren Drucken in Wasserstoff geringer als in Luft; bei kleineren Drucken kehrt sich das Verhältnis um Der Unterschied beträgt etwa 20%, was wohl der größten Veränderung entspricht, die bei einem Gaswechsel auftreten kann. Denn da die Moleküle beim Aufprall auf eine andere temperierte Fläche nicht die dieser Temperatur entsprechende Geschwindigkeit annehmen und die Abweichung dem Molekulargewicht umgekehrt proportional ist, so muß sie bei Wasserstoff am größten sein.

Die Versuche, Ionisationsströme zur Druckmessung zu verwenden, sind bis jetzt noch nicht darüber hinausgekommen, für bestimmte Anordnungen von Entladungsgefäßen oder Verstärkerröhren gewisse Vorschriften aufzustellen, die nur für den besonderen Fall einen Anhalt gewähren.

7. Technik hoher Drucke.

Für die Herstellung hoher Drucke bedient man sich im Laboratorium als Druckpumpe vielfach des CAILLETETschen Modells, bei dem bis etwa 300 Atm. mit dem Pumpenkolben P, dann mit einer Druckschraube D gearbeitet wird, die auf Wasser oder Öl wirken. Die einfache Bauart der Pumpe zeigt Fig. 49. Sie ist aus Rotguß hergestellt, die Ventile bestehen aus Hartgummi und sind durch verschraubbare Öffnungen S_1 und S_2 zugänglich. Die Verbindung mit dem aufzupumpenden Raum und dem Federmanometer, das durch einen Schleppzeiger den Höchstdruck anzeigt, wird durch Kupferkapillaren bewirkt.

Bequem sind für viele Zwecke die Drucke zu verwenden, die man den in käuflichen Bomben komprimierten Gasen entnehmen kann und die man meistens auf Wasser oder Quecksilber wirken läßt. Manche Laboratorien verfügen auch über Druckbehälter, die sie nach Bedarf selbst mit einem Kompressor aufladen können. Solche Maschinen sind bis 200 Atm. in der Technik im Gebrauch, und ihre Wartung macht keine Schwierigkeiten. Fig. 50 stellt eine Vorrichtung zum Komprimieren von Gasen dar[31]), die durch den Anschluß an solche Behälter oder an eine käufliche Bombe betrieben wird. Die beiden zylinderförmigen Stiefel

z_1, z_2 aus Stahl von je 1 l Inhalt liegen nebeneinander, der eine höher als der andere; sie sind durch ein Stahlrohr R miteinander verbunden, in denen die Quecksilberfüllung hin und her fließt, die durch Druckluft in Bewegung gesetzt wird. Der obere Zylinder wird mit dem Versuchsgas durch das Ventil v_3 gefüllt, das komprimiert und in den Versuchsraum gedrückt wird, der hinter dem Ventil v_4 zu denken ist. Ein ähnliches Doppelventil v_1, v_2 auf der andern Seite dient für die Zu- und Ableitung der Druckluft; an den Kapillaren S_1, S_2 läßt sich der Stand des Quecksilbers ersehen. Da das Versuchsgas nur mit dieser Flüssigkeit in Berüh-

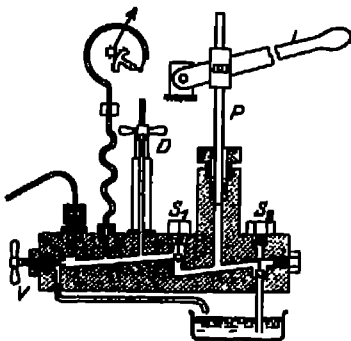
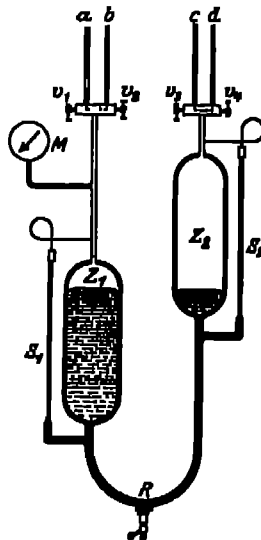
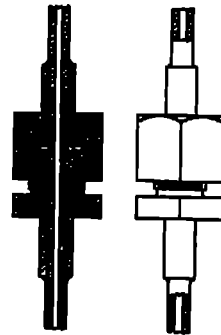



Fig. 49. CAILLETETsche Druckpumpe. Fig. 50. Von Druckluft getriebene Pumpe. Fig. 51. Rohrverbindung.

rung kommt, bleibt es rein. Eine demselben Zweck dienende größere Pumpe, deren Kolben und Ventile durch Quecksilber gedichtet werden, hat KAMERLINGH ONNES[23]) beschrieben.

Hochdruckleitungen, wozu meistens enge Rohre aus Kupfer (bis 1000 Atm.) oder Stahl dienen, verbindet man untereinander durch Überwurfmuttern, wie es Fig 51 zeigt; als Dichtung dient Leder, Fiber oder am besten Pergament. Eine Verbindung für Kupferröhren, die BRIDGMAN beschreibt, besteht darin, daß Ansatzstücke, das eine innen, das andere außen, kegelförmig gestaltet und dann mittels einer Schraube mit einem Links- und einem Rechtsgewinde zusammengezogen werden. Den hohlen Kegel macht man zweckmäßig aus Stahl, den andern aus Messing und lötet sie mit Gewinde an die Kupferrohre (Fig. 52).

An Stelle der Hähne treten bei hohen Drucken konische Stahlventile c, die durch einen Konus gefetteter Lederscheiben gedichtet werden (Fig. 53). Die Schraubenmutter d zum Pressen der Dichtung hat außen und innen dasselbe Gewinde, so daß sie sich auch bei geschlossenem Ventil anziehen läßt. Zum Ansetzen der Anschlußstücke an die Rohre erhalten diese Gewinde, die verlötet werden. Wo Quecksilber zugegen ist und nur Rohre aus Stahl brauchbar sind, tritt an Stelle der Lötung die autogene Schweißung.

Die Verbindungen von Glas und Metall werden gekittet oder verlötet. Bis 100 Atm. sind Kittungen mit rotem Siegellack oder Wachskolopho-

Fig. 52. Rohrverbindung

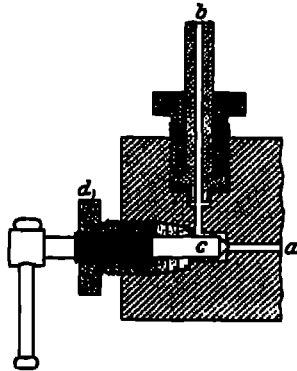



Fig. 53. Druckventil.

Fig. 54. Kittverbindung

niumkitt haltbar, wenn man sich auf kleine Querschnitte beschränkt. Glaskapillare weitet man an der Verbindungsstelle und führt die Metallkapillare ein, die außerdem noch eine Hülse trägt, welche die Glasröhre von außen umfaßt (Fig. 54). Haltbarer als die Kittung ist die Verlötung, wozu die Glasröhre zunächst platiniert, dann galvanisch verkupfert und mit Zinn an die Metallfassung verlötet wird. Für Drucke bis 100 Atm. ist auch eine Verbindung durch eine konische Dichtung haltbar, wie sie in Fig. 53 für die Ventilspindel dargestellt ist, wenn das Glasrohr an die Stelle der Spindel tritt.

Die Festigkeit von Glasrohren kommt namentlich in Frage, wenn sie einseitigem Druck ausgesetzt sind. Sie ist wenig von der Glassorte abhängig, viel mehr von sorgfältiger Kühlung. Röhren von etwa 1 cm Außendurchmesser und halb so großem Innendurchmesser kann man

von 1—2 mm Weite vertragen über 500 Atm. Innendruck. Bei höherer Temperatur ist die Festigkeit viel geringer[34]).

Metallgefäße bereiten, wenn sie durch Gießen hergestellt werden, meist dadurch Schwierigkeiten, daß sie sich bei hohen Drucken als undicht erweisen. Oft lassen sich dann noch die undichten Stellen, die man durch Bestreichen mit Seifenlösung auffindet, durch Verstemmen verbessern. Ventile und Verbindungen setzt man vielfach unter Öl, um Undichtwerden sogleich sichtbar zu machen. Lederdichtungen müssen anfangs mehrfach nachgezogen werden, bevor sie andauernd dicht halten.

Oft wird von einer elektrischen Zuleitung zu dem Hochdruckraum Gebrauch gemacht, die isoliert durch die Metallwand einzuführen ist.

Fig. 55. Isolierte Verbindung.

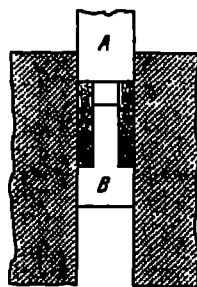



Fig. 56. Dichtung.

BRIDGMAN[35]) verwendet dazu eine Dichtung aus zwei Lagen gedrehter Glimmerscheibchen, die durch eine Gummilage getrennt sind, unter welchen ein Stahlscheibchen liegt (Fig. 55). Darunter ist die Zuleitung durch eine Glasröhre von der Fassung isoliert, die ihrerseits wiederum mit einer Dichtung einzusetzen ist. Am Ende sitzt eine Hartgummischeibe, die mit einer Mutter festgehalten wird.

Dichtungen sollen für hohe Drucke so ausgeführt werden, daß sie durch den Druck undurchlässiger werden, wie Fig. 56 an einer Kolbendichtung zeigt. Der Kolben A drückt mittels je eines Ringes aus hartem und weichem Stahl und einer Gummipackung auf den Stempel B, der einen zentralen Fortsatz besitzt, der so kurz gehalten ist, daß er nicht mit A in Berührung kommt. Hier muß dem Druck, der von unten auf die ganze Fläche von B wirkt, entgegenwirken der Druck auf die Packung, welcher infolgedessen immer höher sein muß, so daß die Packung nicht undicht werden kann.

[34]) F. BERNHARDT, Phys. ZS. 1925, 268.

Schrauben, mit denen Kolben gegen Drucke von über 1000 Atm. bewegt werden, erleiden eine schnelle Abnutzung; für diesen Zweck ist eine hydraulische Presse vorzuziehen.

8. Technik kleiner Drucke.

Für das Arbeiten bei kleinen Drucken sind die Luftpumpen von großer Wichtigkeit. Da sie in einem andern Kapitel ausführlich behandelt werden sollen, wird hier auf den Gegenstand nicht eingegangen, sondern nur auf die Nebenumstände, welche für die Herstellung eines guten Vakuums von Bedeutung sind. Weil die meisten Untersuchungen in Glasgefäßen angestellt werden, so handelt es sich besonders um deren Verhalten beim Auspumpen, und zwar zunächst um ihre Adsorptionsfähigkeit für Gase[26]).

Die Gasmengen, welche Glasgefäße an ihren Wänden adsorbieren, sind vielfach untersucht an Glocken von Glühlampen, für deren Haltbarkeit die vollständige Entfernung dieser später das Vakuum schädigenden Bestandteile von großer Bedeutung sind. So gab eine solche Glocke von 200 cm² Oberfläche, die in Verbindung mit einer durch flüssige Luft gekühlten Röhre 24 Stunde lang bei Zimmertemperatur getrocknet worden war, folgende Mengen an Wasserdampf, Kohlendioxyd und Stickstoff ab:

Nach der Erwärmung auf	H_2O mm³	CO_2 mm³	N_2 mm³
200°	200	5	2
350°	300	20	4
500°	450	30	5

Dagegen erhielt LANGMUIR von einer Glocke, die vorher bis zur Erweichungsgrenze erhitzt war, bei einer zweiten Erwärmung im Vakuum nur 0,18 mm³ H_2O, 0,032 mm³ CO_2 und 0,025 mm³ N_2, welchen gleichmäßig über die Oberfläche verteilt an Molekülllagen entsprächen: 4,5 für H_2O, 1,05 für CO_2 und 0,9 für N. Im allgemeinen nimmt die Gasentwicklung in hoher Temperatur nur sehr langsam ab, was auf eine chemische Zersetzung des Glases hinweist, während sich die an der Oberfläche haftenden Schichten bei weniger hoher Temperatur schnell ablösen.

Metalle entwickeln ebenfalls beim Erhitzen im Vakuum große Gasmengen. Verhältnismäßig leicht zu entfernen sind sie aus Fäden oder Blechen, die mit dem elektrischen Strom geglüht werden können. Andernfalls muß man die Metalle vor dem Gebrauch in Öfen entgasen, und zwar bei einer höheren Temperatur, als sie später im Vakuum auszuhalten haben.

---

[26]) S. DUSHMAN, Production and Measurement of high Vacuum, Schenectady

Um solche Gasreste zu beseitigen, die sich namentlich in den von der Pumpe abgeschmolzenen Gefäßen wieder ansammeln, bedient man sich vielfach chemischer Mittel. In dieser Weise wirkt Kalzium, das durch Erhitzen zum Verdampfen gebracht wird, auf alle Gase mit Ausnahme der Edelgase, so daß man es auch zum Reinigen dieser Gase verwendet[27]). Besonders ist das nitridhaltige Metall wirkungsvoll: seine Absorptionsfähigkeit beginnt schon bei 320°. Unvollkommene Vakua lassen sich auch durch glühende Wolframdrähte verbessern; nach den Beobachtungen LANGMUIRS wird mit Sauerstoff das Oxyd WO_3 gebildet, das schnell verdampft, so daß die Fadenoberfläche metallisch bleibt. Mit Stickstoff bilden verdampfende Wolframteilchen das Nitrid WN_2, mit Kohlenoxyd WCO. Wasserstoff wird bei niedrigem Druck zum Teil in Atome gespalten, die an die Glasoberflächen gehen, aber sich wieder zu Molekülen vereinigen, so daß auf diese Weise das Gas nicht zu entfernen ist. Spuren von Wasserdampf geben in Gegenwart von glühendem Wolfram zu einer andauernden Gasentwicklung Veranlassung, indem sie dissoziieren und WO_3 bilden, welches sich an der Glaswand niederschlägt, während der Wasserstoff aus dem Wolframoxyd wieder Wasser bildet.

Ein Entladungsrohr erfordert bei längerem Gebrauch immer größere Spannungen; es wird härter und zuletzt für die Entladung undurchdringlich. Hierbei wirken nicht allein chemische Ursachen, da auch reines Helium und Neon absorbiert werden. Wahrscheinlich werden diese Gase von dem Niederschlag aufgenommen, der sich infolge der Zerstäubung der Kathode auf der Gefäßwand zu bilden pflegt.

Außer mit Pumpen kann man eine Druckerniedrigung in Gasen auch mit Stoffen hervorbringen, welche die Gase adsorbieren. Der wirksamste in dieser Beziehung ist die Holzkohle, die besonders bei tiefer Temperatur, wo DEWAR zuerst (1904) davon Gebrauch machte, eine große Aufnahmefähigkeit für Gase besitzt, und zwar wird ein Gas in um so stärkerem Maße adsorbiert, je höher sein Siedepunkt liegt, ausgenommen Neon, das trotz seines höheren Siedepunktes weniger adsorbiert wird als Wasserstoff. Helium wird entsprechend seinem tiefen Siedepunkt nur in ganz geringer Menge von der Kohle aufgenommen, bei gewöhnlicher Temperatur gar nicht, während 1 g Kohle bei 25° noch 51,0 cm^3 Kohlensäure, 8,2 Stickstoff und 0,81 Wasserstoff adsorbiert[28]).

Für die Herstellung der Holzkohle eignet sich am besten Kokusnußschale. Sie wird in einer Muffel unter Luftabschluß stundenlang bei dunkler Rotglut so lange erhitzt, bis sich keine Dämpfe mehr entwickeln,

[27]) RUFF und HARTMANN, ZS. anorg. Chem. 121, 167. 1922.

[28]) HOWARD u. HULETT, Journ. phys. Chem. 28. 108. 1924. — H. ROWE,

und dann kurze Zeit auf noch höhere Temperatur gebracht. Darauf füllt man die Kohle in Glasröhren und pumpt sie bei einer Temperatur von 400° ab. Zum Evakuieren wird die Kohle gewöhnlich mit flüssiger Luft abgekühlt, zur Erzeugung hoher Vakua des Wasserstoffs besser mit diesem verflüssigten Gase. Die Absorptionsfähigkeit der Kohle wird vergrößert, wenn man sie öfter, nachdem sie bei der Temperatur der flüssigen Luft mit Luft gesättigt ist, bei 400° auspumpt, wodurch die Porosität verbessert wird und die Kohlenwasserstoffe entfernt werden. Eine Erwärmung über 1000° wirkt schädlich; dabei nimmt auch die Dichte ab, die sonst mit 2,2 der des Graphits gleichkommt[28])

Die folgende Tabelle enthält die Adsorption von Stickstoff, Neon und Wasserstoff in tiefer Temperatur nach den Beobachtungen CLAUDES[29]), in Abhängigkeit vom Druck sind die Volumina (cm³ bei 0° und 760 mm Druck) angegeben, die von 1 g Kohle aufgenommen wurden.

N_2 bei —182,5°		H_2 bei —195,5°		Ne bei —195,5°	
p (mm Hg)	cm³/g	p (mm Hg)	cm³/g	p (mm Hg)	cm³/g
0,004	9,35	0,006	0,105	0,45	0,105
0,010	18,70	0,0115	0,21	0,88	0,21
0,032	37,4	0,0205	0,42	1,30	0,32
0,088	46,6	0,036	0,84	1,74	0,42
0,385	56,0	0,083	2,05	3,50	0,64
1,107	65,8	0,176	3,71	5,30	1,22
11,50	93,0	0,475	8,40	7,20	1,63
33,2	103	1,000	14	11,30	2,44
90	112	3,50	28	15,5	3,25
247	121	8,7	42	19,4	4,06
		20,6	56	30,5	6,18
		43,7	63	40,5	8,01

He bei —195,5°, 27 mm Hg und 0,21 cm³/g.

Die verschiedene Aufnahmefähigkeit der Kohle für die einzelnen Gase kann zu deren Trennung und Absonderung aus den Gemischen benutzt werden. Am einfachsten ist auf diese Weise die Reinigung des Heliums, indem man die Kohle in tiefer Temperatur mit dem Gasgemisch in Berührung bringt und das Helium dann abpumpt[30]). Aber auch Xenon und Krypton, für welche die Adsorption entsprechend ihren nahe zusammenliegenden Siedepunkten nicht sehr verschieden ist, lassen sich noch trennen.

Wasserstoff wird von Palladium absorbiert. Die Aufnahmefähigkeit des Metalls, welche als Lösungsvorgang zu betrachten ist, hängt von seiner Vorbehandlung ab und wächst ebenfalls mit abnehmender Temperatur

[29]) G. CLAUDE, C. R. 158, 861. 1914.

stark, wie die folgende, von VALENTINER[31]) beobachtete Tabelle zeigt, welche die von Palladiumschwarz aufgenommenen Wasserstoffmengen für einige Temperaturen in Abhängigkeit vom Druck angibt.

20°		−78°		−190°	
p (mm Hg)	cm³/g	p (mm Hg)	cm³/g	p (mm Hg)	cm³/g
0,001	0,10	0,014	0,27	0,0005	2,05
0,005	0,26	0,031	0,33	0,0015	2,11
0,037	0,40	0,056	0,37	0,001	3,00
0,110	0,52	0,087	0,41	0,001	9,1
0,190	0,59	0,184	0,49	0,002	33,0
0,315	0,70	0,30	0,55	0,005	40,0
0,52	0,82	0,52	0,61	0,012	47,2
0,76	0,92	0,88	0,67	0,025	63,0

Palladiumschwarz kann zur Verbesserung des Vakuums von Verstärkerröhren usw. dienen. Schmilzt man diese von der Pumpe bei etwa 350° ab, nachdem man einige Milligramm des Metallpulvers eingefüllt hat, so werden davon alle später bei dem Entladungsvorgang entwickelten Gase schon bei Zimmertemperatur absorbiert Auf dieselbe Weise lassen sich hohe Vakua mit Holzkohle aufrechterhalten.

Verwendet man in einer Entladungsröhre heiße Alkalimetalle als Kathode, so nimmt diese alle chemisch aktiven Gase auf und läßt nur die Edelgase übrig. Stickstoff wird schon bei Zimmertemperatur aufgenommen, Wasserstoff von Natrium bei 200°, von Kalium bei 175° und von Rubidium und Cäsium bei noch tieferer Temperatur[32]).

Neuntes Kapitel.

Kompressibilität.

1. Feste Körper.

Wirkt auf die Oberfläche eines Körpers allseitig der Druck p und nimmt dadurch das Volumen v um Δ v ab, so heißt $\chi = \Delta v/pv$ die Kompressibilität oder Zusammendrückbarkeit. Wir setzen dabei voraus, daß der Körper isotrop ist, was in der Wirklichkeit oft nicht zutrifft und immer erst geprüft werden muß. Alsdann ändert sich mit dem Volumen die Gestalt nicht, sie bleibt der ursprünglichen ähnlich.

$^1/_\chi$ bezeichnet man als Modul der Volumenelastizität entsprechend dem Modul der Dehnung $E = {}^1/_\alpha$, wo α die Dehnbarkeit ist, das ist die Verlängerung, welche die Längeneinheit eines Körpers vom Querschnitt

[31]) S. VALENTINER, Verh. d. D. Phys. Ges. 1911, 1003.

1 unter der dehnenden Kraft 1 erfährt Wird p in Bar gemessen, die Fläche in cm^2, so haben die Moduln die Dimension $[cm^{-1} \cdot g \cdot sek^{-2}]$ Im technischen Maß, wo man p in kg* und die Fläche in mm^2 auszudrücken pflegt, ist der Zahlenwert $981 \cdot 10^5$ mal kleiner.

Zwischen der Dehnung α, der Zusammendrückbarkeit χ und dem Verhältnis μ der Dehnung zu der dazu senkrechten Verkürzung (POISSONscher Koeffizient) besteht nach der Theorie die Gleichung $\chi = 3\,\alpha\,(1 - 2\,\mu)$ μ liegt bei Metallen zwischen $1/_4$ und $1/_3$. Sind demnach α und μ bestimmt, so läßt sich χ berechnen[1])

Die ersten erfolgreichen Messungen der Zusammendrückbarkeit fester Körper stellte REGNAULT (1847) an, und zwar untersuchte er Kupfer und Glas, woraus seine Gefäße bestanden, in denen er die Kompressibilität von Flussigkeiten bestimmen wollte. Um diese einem allseitigen Druck auszusetzen, bediente er sich des Piezometers (OERSTEDT 1822) Dieses besteht aus einem großen, starkwandigen, eisernen Behälter, gefüllt mit Wasser, Quecksilber oder einer anderen Flüssigkeit, in welcher die zu komprimierenden kleineren Gefäße hineingebracht werden, so daß darauf dann allseitig ein auf die Flüssigkeit ausgeübter Druck einwirken kann Die an dem eigentlichen Gefäß von Kugel- oder Zylinderform sitzende Kapillare ragt aus dem Druckraum ins Freie und wird zu diesem Zweck mit einer Metallhülse verkittet, die in einer Öffnung der Wand unter Zwischenlage einer Lederdichtung eingesetzt und mit einer kräftigen Schraubenmutter festgehalten wird. Die Drucke werden durch komprimierte Luft oder durch eine hydraulische Presse ausgeübt.

Später wiederholte AMAGAT[2]) die Versuche REGNAULTS, benutzte dabei aber eine andere Form der Metall- und Glasgefäße, nämlich Zylinder mit ebenen Endflächen. Sonst besaßen die Gefäße auch aus dem Druckraum herausragende Kapillaren, an deren Teilung der Stand der Füllung abgelesen wurde, wenn ebenso wie früher der Druck p auf das Gefäß erstens nur von außen durch die Piezometerflüssigkeit, zweitens von außen und innen und drittens nur von innen wirkte. Für diese drei Fälle ergeben sich die folgenden Terme für die Änderung Δ v des inneren und des äußeren Gefäßvolumens v und v′, wenn r_a und r_i dessen äußeren und inneren Radius bezeichnen:

$$\text{I.}\quad \Delta v_1 = -\frac{\alpha\,(5 - 4\mu)\,r_a^3}{r_a^3 - r_i^3}\,p\,v,$$

$$\text{II}\quad \Delta v_2 = -3\,\alpha\,(1 - 2\,\mu)\,p\,v,$$

$$\text{III.}\quad \Delta v' = \frac{\alpha\,(5 - 4\mu)\,r_i^3}{r_a^3 - r_i^3}\,p\,v' = \frac{\alpha\,(5 - 4\mu)\,r_a^3}{r_a^3 - r_i^3}\,p\,v.$$

---

[1]) E. GRÜNEISEN, Ann. Phys. 25, 848, 1908.

Daraus folgt, daß die Änderung des inneren Volumens durch den äußeren Druck gleich ist der des äußeren Volumens durch den inneren Druck

Aus diesen Beziehungen ergibt sich auch μ, wenn die Dehnbarkeit α gemessen wird An Glasröhren, die niemals ganz gerade sind, ist eine solche Bestimmung schwierig. Hier wurde außer der Beziehung I noch die folgende IV benutzt

$$\text{IV.} \quad \Delta v_3 = \alpha (1 - 2 \mu) P v/q,$$

wo Δv_3 die Volumenänderung bezeichnet, welche das Rohr vom inneren Querschnitt q bei einer Dehnung durch die Kraft P erfuhr.

Die verschiedenen Methoden setzen große Homogenität der Probestücke voraus und erlauben namentlich bei weichen Stoffen keine Anwendung starker Drucke, weil sonst dauernde Deformationen entstehen.

AMAGAT wandte deshalb noch ein direkteres Verfahren zur Bestimmung von χ an, das vollständig von theoretischen Beziehungen unabhängig ist. Es setzt nur voraus, daß das Probestuck bei der Deformation ähnlich bleibt. Der zu messende Stab von der Länge l wird in einem starken Stahlzylinder einem allseitigen Druck unterworfen. Verkürzt er sich dabei um Δ l, so ist

$$\chi = \frac{3 \Delta l}{l p}.$$

Das Verfahren entspricht der Bestimmung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten aus dem linearen Die Verkürzung wurde durch einen Stempel gemessen, dessen Berührung mit dem Probestab sich elektrisch einstellen ließ und der durch eine Dichtung von Melasse ähnlich wie der Stempel einer Druckwage ins Freie geführt war, wo die Verschiebung gegen eine vom Druckzylinder nicht beeinflußte Marke abgelesen wurde. Sie betrug für ein Glasrohr von 1 m Länge bei dem höchsten Druck von 2000 Atm., der durch Wasser übertragen wurde, 1,5 mm und verlief linear mit dem Druck.

Die weitere Ausbildung des Verfahrens hat sich besonders BRIDGMAN[3]) angelegen sein lassen. Die Verkürzung, die ein Eisenstab von 30 cm Länge bis zu Drucken von 12 000 Atm. in einem Zylinder aus Chrom-Vanadiumstahl erfuhr, wurde ebenfalls durch einen elektrisch einstellbaren Stempel von dem Stabe nach außen übertragen und hier gegen eine am Zylinder befestigte Marke gemessen Es war also noch an dieser Verschiebung eine Korrektion (etwa 2%) wegen der Dehnung des Zylinders anzubringen, die mit Spiegel und Skale bestimmt wurde. Mit dem Stempel verschob sich ein Draht aus Nickelchrom an einem Kontakt, dessen

[3]) P. W. BRIDGMAN, Proc. Amer. Acad. 44, 255 1909; 47, 362. 1911 u. 58, 165 1923

Stellung durch eine empfindliche Widerstandsmessung festgelegt wurde, eine Bewegung von $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ cm war noch merklich. Selbst bei dem höchsten Druck war die Abweichung der Zusammendrückbarkeit vom linearen Verlauf sowohl bei 30° als bei 75° nur schwach.

Der Eisenstab, so gemessen, diente als Normal, mit dem 30 andere Stäbe aus verschiedenen Metallen verglichen wurden, indem deren lineare Kompressibilität gegen die des Eisens in ähnlicher Weise durch die Verschiebung des elektrischen Kontakts ermittelt wurde. In den Fällen, wo der Unterschied gegen die lineare Kompressibilität des Eisens klein war, wurde sie durch Hebelübertragung vergrößert. Im allgemeinen nimmt die Kompressibilität mit wachsendem Druck ab und mit steigender Temperatur zu. Bei den nichtregulären Metallen finden sich Unterschiede der Kompressibilität in den verschiedenen Kristallrichtungen, wie es auch bei dem Ausdehnungskoeffizienten der Fall ist.

Ein zylindrisches, beiderseits geschlossenes Rohr von der Länge l und dem äußeren und inneren Radius r_1 und r_2 erfahre durch einen Innendruck p die Verlängerung Δl; dann ist[4]).

$$\chi = 3\,\frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1^2}\,\frac{\Delta l}{l\,p}.$$

Die Deformation kann man sich zusammengesetzt denken aus einer Dehnung durch den Druck auf die Endflächen, die von einer Querkontraktion begleitet ist, und einer Verkürzung durch den Druck auf die innere Zylinderfläche, der zugleich den Querschnitt weitet; also

$$\left(\frac{\Delta l}{l\,p}\right)_1 + \left(\frac{\Delta l}{l\,p}\right)_2 = \frac{\alpha\, r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2\,\alpha\,\mu\, r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}.$$

GRÜNEISEN[5]) hat das Verfahren benutzt, um die Abhängigkeit der Kompressibilität von der Temperatur zwischen − 190° und + 165° zu untersuchen, wobei die durch die thermische Ausdehnung bewirkten Störungen dadurch unschädlich gemacht wurden, daß man zwei gleiche Rohre benutzte; davon deformierte man nur das eine und maß seine Längenänderung relativ gegen das andere, das sich in demselben Bade befand mit Skale und doppeltem Spiegel (S 56).

2. Flüssigkeiten.

Flüssigkeiten werden im Piezometer allseitigem Druck ausgesetzt, wenn ihre Kompressibilität bestimmt werden soll. Dabei erleiden die Gefäße, durch welche sie abgegrenzt werden, eine Volumenverminderung: man beobachtet die scheinbare Kompressibilität, fügt diejenige (χ_0) der Gefäßwandung hinzu und erhält alsdann die Kompressibilität χ des

4) A. MALLOCK, Proc. R. Soc. 74, 50. 1905.

Gefäßinhalts. Beobachtet man in der Gefäßkapillare vom Querschnitt F eine Verschiebung der Kuppe um die Strecke h, so daß $\Delta v = h F$, so ergibt sich $\frac{\Delta v}{p v} = \chi - \chi_0$. χ_0 erreicht oft einen großen Betrag: z. B 60% bei der Beobachtung von Quecksilber in Glasgefäßen und 15% in Stahl, jedoch nur 6% bei Wasser in Glas, was sich daraus erklärt, daß Quecksilber unter allen Flüssigkeiten die kleinste Zusammendrückbarkeit besitzt. Sie beträgt nach BRIDGMAN bei 0° und 22° bis 7000 bzw. 12 000 kg*/cm²:

$$0° \quad \Delta v = 3{,}82 \cdot 10^{-6} p - 5{,}71 \cdot 10^{-11} p^2 ,$$
$$22° \quad \Delta v = 3{,}90 \cdot 10^{-6} p - 6{,}00 \cdot 10^{-11} p^2 .$$

Das Metall kann als Normalflüssigkeit dienen, wenn umgekehrt χ_0 für ein Gefäß bestimmt werden soll. Auch läßt sich in einem Gefäß von bekannter Kompressibilität ein Teil der Flüssigkeit durch einen festen Körper und so dessen Kompressibilität messen.

Für diese verschiedenen Zwecke dienen mannigfache Formen der Piezometergefäße Bequem ist die schon erwähnte Form, bei der die Kapillare aus dem Druckraum herausragt, so daß sich die Kuppe ablesen läßt. Für höhere Drucke schließt man die Piezometer vollständig in den Druckraum ein und bestimmt den Stand der Kuppe an elektrischen Kontakten, wie Fig. 57 an einem Gefäß AMAGATS[6]) zeigt. Zwischen je zwei Kontakten liegt ein kleiner isolierter Widerstand aus Platindraht, der auf das Gefäß aufgewickelt ist, und die Zuführungsdrähte gehen einerseits zum obersten Kontakt, andererseits zur Quecksilberfüllung des Druckraums, die mit der Vergrößerung des Drucks im Piezometer höher steigt, weil das Volumen der Versuchsflüssigkeit abnimmt.

Für die Einführung fester Stoffe sind die Formen von RICHARDS[7]) mit Deckel zweckmäßig, die nach der Füllung verkittet werden; es wird der Druck beobachtet, bei dem sich der Kontakt aus dem komprimierten Quecksilber abhebt (Fig. 58).

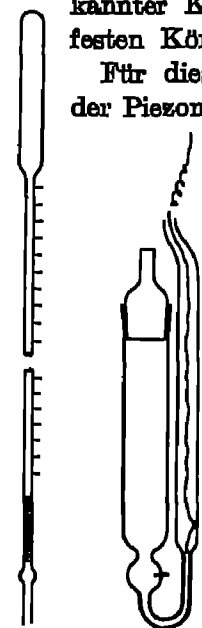



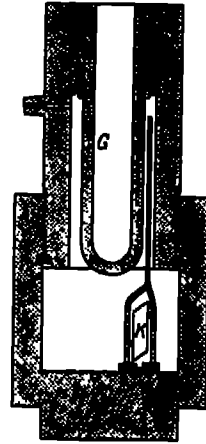
Fig 57 Fig 58. Piezometergefäß.

Das Piezometer von MADELUNG und FUCHS[8]) stand ebenfalls samt der Kapillare in dem Druckraum, und die Bewegung der sich in ihr verschiebenden Quecksilberkuppe wurde von außen durch die eingekittete Glas-

[6]) E. H. AMAGAT, Ann. de chim. et de phys. (6) 29, 68. 1893.
[7]) TH. RICHARDS, ZS. phys. Chem. 61, 449. 1908; 71, 152. 1910; J. Am. Ch. Soc. 43, 1538. 1921.

röhre G (Fig. 59) mit einer endoskopartigen Vorrichtung abgelesen. Bei einer Wandstärke von 1 cm und einer Weite von 3 cm hielt die Röhre 400 kg*/cm² aus Nach Einführung des zu untersuchenden Kristalls K wurde das weite Ende des Piezometers mit einer durchbohrten ebenen Bodenplatte durch Klebwachs verkittet, darauf das Quecksilber eingefüllt und zuletzt das Loch mit einer zweiten Platte verschlossen. Nachdem das Gefäß aufgerichtet war, wurde die obere Öffnung der Kapillare durch einen Gummistutzen mit einer weiten Glasröhre verbunden, die Luft enthielt und dadurch das den Druck übertragende Wasser vom Piezometer abhielt.

Fig. 59. Piezometer.

Eine Durchsicht durch den Druckraum, den AMAGAT bis 1000 Atm. und einer Temperatur von 300° benutzte, gewährten kleine Fenster, die in zwei gegenüberliegenden, weit vorspringenden Rohren angebracht waren. In der Mitte wurde die Kapillare des Piezometers durch eine Schraube von außen gehoben und damit die Kuppe des Quecksilbers in das Gesichtsfeld der Rohre gebracht.

Die Anwendung von Stahlgefäßen für das Piezometer, die sich wegen der geringen Eigenkompressibilität des Stahls empfiehlt, setzt andere Beobachtungsverfahren voraus. So bestimmte BRIDGMAN[9]) die Abnahme des Volumens von Quecksilber, das er in einem Stahlzylinder von 1,3 cm Durchmesser und 9 cm Länge einem allseitigen Druck bis 6000 Atm. unterwarf, durch die Verschiebung eines Stempels von 0,16 cm Durchmesser, welcher in die Flüssigkeit eingetrieben wurde. Der Stempel paßte genau in die Bohrung des Zylinderdeckels und war ähnlich wie derjenige der Druckwage durch ein Gemisch von Melasse und Glyzerin gedichtet. Die Bewegung des Stempels ergab sich aus der Verrückung eines Schleifringes, der bei dem Rückgang nicht mitfolgte.

In einer zweiten Untersuchung[10]) über denselben Gegenstand, die BRIDGMAN bis 12 000 Atm. und über ein Temperaturgebiet von − 38,8° bis + 20° ausdehnte, befand sich das Quecksilber in einer Menge von 3—4 cm³ in einem Stahlzylinder, den es nicht ganz füllte; den übrigen Raum nahm etwas Wasser ein, das auf dem Quecksilber schwamm. Der aufgeschraubte Deckel besitzt einen sehr feinen Kanal und eine ausgehöhlte Oberfläche, die ebenfalls mit Quecksilber bedeckt wird. Bei Anwendung des allseitigen Drucks dringt Quecksilber durch den Kanal in den Zylinder, und bei der Abstellung bleibt es darin, während Wasser heraustritt.

[9]) P. W. BRIDGMAN, Proc. Amer. Acad. 44, 255. 1909.

Stellt man den Zylinder umgekehrt in das Wasser des Druckraum so kann man ihn ganz mit Quecksilber füllen. Unter Druck dringt dan Wasser ein, während nach dem Abstellen des Drucks Quecksilber heraus tritt. Auch hier erwies es sich zweckmäßig, schon anfangs etwas Wasse in den Zylinder zu gießen, weil diese Flüssigkeit besser alle Poren usw ausfüllt.

Das Verfahren setzt die Kenntnis der Kompressibilität von Wasse und Stahl voraus. Die letztere wird besonders in der schon angegebene Weise bestimmt. Die erstere verlangt eine zweite Beobachtungsreih für Wasser: in der aufrechten Stellung des Zylinders wird er ganz mi Wasser gefüllt; unter Druck dringt Quecksilber aus dem Deckel ein das zurückbleibt beim Abstellen des Drucks, dafür tritt Wasser aus In der umgekehrten Stellung bedeckt man den Zylinderboden mit etwa Quecksilber; Wasser dringt ein und Quecksilber fließt aus. Der erst Versuch ähnelt dem Verfahren von AIMÉ (1842), der ins Meer einen mi Wasser gefüllten Glaskolben hinabsenkte, welcher durch eine fein Kapillare mit einem Quecksilberbehälter in Verbindung stand, was damal zu keinem Ergebnis führte.

BRIDGMAN hat die beiden Versuchsreihen für Quecksilber und Wasser zusammen durchgeführt und sie dann mit Näherungsverfahren berechnet

Ist V das Anfangsvolumen des Piezometers, V_w das des Wassers V_q das des Quecksilbers, so daß $V = V_w + V_q$ und nimmt ferner be dem betrachteten Druck die Volumeneinheit von

Wasser um Δv_w,
Quecksilber um Δv_q,
Stahl um Δv_s ab

und dringt in das aufrechte Piezometer ΔV_q Quecksilber, gemessen bei Atmosphärendruck und fließt aus dem umgekehrten Piezometer ΔV_q Quecksilber, gemessen bei Atmosphärendruck usw, so gilt, da das Volumen des Piezometers $V - V \cdot \Delta v_s$ ist:

für die aufrechte Stellung

$$\Delta v_w = \frac{\Delta V_q + V \cdot \Delta v_s - \Delta v_q (\Delta V_q + V_q)}{V_w},$$

$$\Delta v_q = \frac{\Delta V_q + V \cdot \Delta v_s - V_w \cdot \Delta v_w}{V_q + \Delta V_q};$$

für die umgekehrte Stellung

$$\Delta v_w = \frac{\Delta V_q + V \cdot \Delta v_s - V_q \Delta v_q}{V_w + \Delta V_q},$$

$$\Delta v_q = \frac{\Delta V_q + V \cdot \Delta v_s - \Delta v_w (V_w + \Delta V_q)}{}$$

Die Untersuchung des Wassers und einer Anzahl anderer Flüssigkeiten, die AMAGAT bis zu Drucken von 3000 Atm. durchgeführt hatte, sind von BRIDGMAN[11]) nach dem beschriebenen Verfahren bis 12 000 Atm. fortgesetzt worden. Der Druck wurde dabei mit einem Manganinwiderstand gemessen, der von Kerosin umgeben war, welches bei hohen Drucken nicht erstarrt, wie z. B. Kastoröl, und welches durch Quecksilber von der zu untersuchenden Flüssigkeit getrennt gehalten wurde.

3. Gase.

Die Kompressibilität der Gase ist viel größer als die der Flüssigkeiten. Geht man also von einem Volumen bei dem Normaldruck aus und behält immer dieselbe Gasmenge bei, so gelangt man bei starkem Druck zu sehr kleinen Volumina. Dementsprechend sind die Piezometergefäße wie die Gasmanometer (Fig. 43) geformt, wo das Gas auf einen immer kleiner werdenden Raum zusammengedrängt wird, wenn das Quecksilber mit der Zunahme des allseitigen Drucks höher steigt. Die Genauigkeit der Messung wird also geringer mit steigendem Druck. Diesem manometrischen Verfahren (ANDREWS 1876) steht das volumetrische (NATTERER 1844) gegenüber, bei dem ständig mit wachsendem Druck die Gasmenge vermehrt wird, so daß das Volumen im Piezometer konstant bleibt, aber das nach der Entspannung entstehende Niederdruckvolumen zunimmt. An einigen Beispielen sollen die Einrichtungen für beide Methoden beschrieben werden, wobei wir uns auf die Kompression mit größeren Drucken beschränken können. Denn die Versuche bei schwachen Drucken lassen sich mit dem Gasthermometer ausführen, auf das in dieser Beziehung verwiesen sei.

Die Grundlage für unsere Kenntnis über die Kompressibilität der Gase bilden die Arbeiten AMAGATS, der die damals bekannten einfachen Gase sowie mehrere ihrer Verbindungen zwischen 0° und 250° bis zu Drucken von 3000 Atm. untersuchte. Dazu benutzte er dieselben Vorrichtungen zur Messung und Erzeugung des Drucks wie für die Versuche mit Flüssigkeiten. Das Piezometer von bekanntem Volumen wurde nach der Füllung bei niedrigen Druck und bekannter Temperatur gemessen und unter Quecksilberverschluß in den Druckraum gebracht, so daß die dem Versuch unterworfene Gasmenge genau bestimmt war. Der Druck wurde anfangs durch eine Pumpe, darauf durch einen Stempel gesteigert, welcher sich in den Druckraum durch eine Schraube eintreiben ließ. Für die verschiedenen Temperaturen 0°, 15°, 100°, 200° und 250° wurden auf diese Weise Isothermen gemessen, die entweder v oder pv als Funktion von p darstellen.

Eine lange Reihe von Messungen, welche unterhalb 0° Isothermen der Gase bis 60 Atm. bestimmen, sind seit 1901 im Kältelaboratorium zu Leiden unter der Leitung von KAMERLINGH ONNES ausgeführt worden. Die dabei benutzte Versuchsanordnung[12]) (Fig. 60) ist der Anwendung auf die tiefsten Temperaturen angepaßt. Das Glasgefäß A, welches ebenso wie bei AMAGAT mit dem Gase gefüllt in den Druckraum gebracht wird, hat einen längeren herausragenden Fortsatz B von etwa 3 mm Weite, an den sich mittels einer Stahlkapillare K das eigentliche Piezometer C aus Glas schließt, das auf die Meßtemperatur gebracht wird. Sein Volumen schwankt zwischen 1 und 20 cm³; die verschiedenen Größen werden je nach den zu messenden Temperaturen und Drucken ausgewechselt, so daß man auch bei den tiefsten Temperaturen und dem höchsten Druck mit etwa derselben Gasmenge auskommt. Der Gasvorrat, welcher sich in dem aus dem Druckraum herausragenden Fortsatz befindet, erlaubt die Herstellung verschiedener Drucke für jede Isotherme. Zu diesem Zweck wird Quecksilber durch Druckluft aus dem Behälter D in den Fortsatz getrieben, der durch eine Wasserspülung auf konstanter Temperatur zu halten ist. Der Druck wird durch ein Gasmanometer gemessen, das an ein offenes, gebrochenes Quecksilbermanometer angeschlossen ist.

Fig. 60. Leidener Piezometer.

Endlich liegen noch die Messungen über die Kompressibilität von Gasen vor, die in der P.-T. Reichsanstalt zwischen — 180° und 400° bis zu 100 Atm. angestellt worden sind[13]). Anfangs wurden diese Versuche zwischen 0° und 200° mit einem Piezometer A aus Glas von 110 cm³ Inhalt ausgeführt, dessen Kapillare aus dem Druckraum hervorragte. Sie war mittels einer Platinkapillare mit dem Verteilungsstück v_1 v_2 (Fig. 61) verbunden, welches das Piezometer durch das Ventil v_1 gegen das Niederdruckvolumen abgrenzt. Durch das Ventil v_2 wurde das Piezometer gefüllt vom Stiefel P_2 der Quecksilberdruckpumpe aus, in der das Queck-

[12]) H. KAMERLINGH ONNES u. T. HYNDMAN, Comm. Lab. Leiden Nr. 69, 1901. — H. KAMERLINGH ONNES u. C. BRAAK, ebd. Nr. 97a, 1906.

[13]) L. HOLBORN u. H. SCHULTZE, Ann. Phys. 47, 1089. 1915. — L. HOLBORN

silber durch Druckluft bewegt wurde, welche in den Stiefel P_1 ein- und ausgelassen wurde. Dieser war mit dem Druckraum B verbunden, in welchem infolgedessen der Druck in demselben Maße verstärkt werden konnte wie im Piezometer. Der Stiefel P_2, der etwa 1 l faßte, wurde mehrfach bei Atmosphärendruck mit dem zu messenden Gase gefüllt und der Inhalt so lange in das Piezometer hinübergeschafft, bis dort der gewünschte Druck erreicht war. Das Niederdruckvolumen, in welches das entspannte Gas nach Öffnen des Ventils v_1 einströmte, bestand aus einer Reihe von Glaskolben V_1, V_2, V_3, die in einem gemeinsamen Wasserbade an einer Gasleitung lagen, von der sie beliebig durch Hähne getrennt werden konnten. Auf diese Weise wechselte man in bekanntem Maße mit

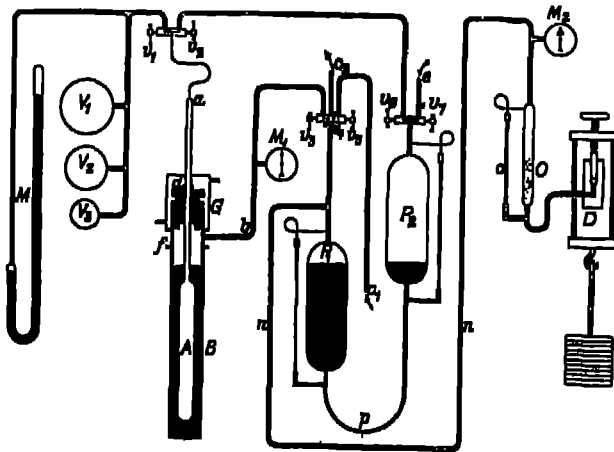



Fig. 61. Piezometer der P.-T. Reichsanstalt.

dem Volumen zwischen 1,4 und 15 l derart, daß der Druck, der durch das Quecksilbermanometer M gemessen wurde, stets in der Nähe einer Atmosphäre lag. Der Druckraum stand mit dem Ölstand Oo in Verbindung, an welchen die Druckwage D angeschlossen war. Der damit gemessene Druck war etwas kleiner als der im Piezometer; den Unterschied ergab die Ablesung an dem mit der Hochdruckpumpe vereinigten Differentialmanometer. In der Regel wurden Drucke von 25, 50, 75 und 100 Atm. beobachtet.

Später wurde das Glaspiezometer durch ein dickwandiges eisernes Gefäß ersetzt, auf das kein Außendruck wirkte, so daß kleinere Temperaturbäder ausreichten. Als sich diese Einrichtung bewährte, wurde sie auch für die Versuche unterhalb 0° benutzt. Doch war hier nur ein halb so großes eisernes Gefäß notwendig.

Die pv-Werte einer Isotherme lassen sich, wenn man nicht zu nahe an die kritische Temperatur des Gases herangeht, in dem beobachteten

und im größeren Abstand vom kritischen Punkte reichen sogar zwei Glieder aus· die Isothermen verlaufen hier geradlinig bis $p = 100$ Atm. Der Koeffizient B als Funktion der Temperatur wird durch eine Gleichung von der Form $\left(\frac{d\,(vp)}{d\,p}\right)_{p=0} = B = a + bT + \frac{c}{T} + \frac{e}{T^2}$ ausgedrückt, woraus sich für kleine Drucke die Zustandsgleichung $vp = a' + \left(a + bT + \frac{c}{T} + \frac{e}{T^2}\right) p$ ergibt.

Bridgman[14]) hat neuerdings die Kompressibilität von Gasen bis zu einem Druck von 15 000 Atm. untersucht. Er ging hierbei unter Verwendung kleiner Gasmengen von einem Anfangsdruck von 2000 Atm. aus und versuchte dasselbe Verfahren wie bei Flüssigkeiten, indem er in einen mit dem Versuchsgase gefüllten Stahlzylinder einen Stempel trieb und dessen Verschiebung maß. Es wurden Zylinder von 5 cm äußerem und 0,6 cm innerem Druckmesser benutzt. Stieg der Druck über 9000 Atm , so bildeten sich jedoch bei der Füllung mit Wasserstoff Risse in der Wandung, aus denen das Gas mit Heftigkeit entwich, obwohl das Gefäß vorher bei der Probe mit einer Wasserfüllung einen Druck von 25 000 Atm. ausgehalten hatte. Bei anderen Gasen, z. B. bei Helium, trat diese Erscheinung nicht auf, wohl aber in schwächerem Maße bei Luft; ferner war sie schon früher bei der Füllung mit Quecksilber beobachtet worden. Eine bessere Haltbarkeit der Stahlgefäße ließ sich dadurch erreichen, daß man sie einem allseitigen Druck unterwarf. Es wurde deshalb in folgender Weise vorgegangen: Der allseitig geschlossene Versuchszylinder, der am Boden ein nach innen sich öffnendes Ventil besaß, wurde aus einem anderen Behälter mit Gas auf einen Druck von 2000 Atm. gefüllt, darauf mit Kerosin in ein zweites Druckgefäß gebracht, in welchem der Druck durch die Verschiebung eines Stempels hervorgebracht wurde. War der Füllungsdruck des Gases erreicht, so öffnete sich das Ventil, und das Kerosin drang ein. Die Volumenänderung, welche bei dem Vorrücken des Stempels beobachtet wurde, setzte sich zu etwa gleichen Teilen zusammen aus der Kompression des Gases und derjenigen von Kerosin und Stahlzylinder. Zur Bestimmung des letzteren Teils wurde auch bei Einsatz von massiven Stahlzylindern beobachtet. Der Druck wurde mit einem Manganinwiderstand, die Gasmenge durch Wägung des etwa 30 g schweren Zylinders vor und nach der Füllung bestimmt. Die Kompressibilität der Gase erwies sich bei den hohen Drucken von der selben Größe wie die der Flüssigkeiten unter gleichen Bedingungen; sie war viel kleiner als die der Flüssigkeiten bei niedrigem Druck.

[14]) P. W. Bridgman, Proc. Amer. Acad. 59, 173. 1924.

II. Wärme.

Zehntes Kapitel.

Temperatur.

1. Grundlagen der Thermometrie.

Jede Eigenschaft eines Körpers, die sich stetig mit der Temperatur ändert, kann man als Merkmal seines Wärmezustandes betrachten. Zuerst wurde fast ausschließlich für diesen Zweck die Ausdehnung verwandt, und erst später sind auch der Sättigungsdruck, der elektrische Widerstand, die Thermoelektrizität, die Strahlung usw. als Temperaturmaße benutzt worden. Für Thermometer, die auf der Ausdehnung beruhen, wählte man Flüssigkeiten oder Gase wegen ihrer großen Ausdehnung gegenüber den festen Körpern. Die Gase empfahlen sich als thermometrische Normalstoffe, weil man annahm, daß alle dieselbe Ausdehnung besitzen. Als später genauere Messungen (Magnus, Regnault) ergaben, daß sich die Gase verschieden ausdehnen, blieb dem Gasthermometer der Vorzug, daß seine Skale der thermodynamischen, die in der Wissenschaft mit der Entwicklung der Thermodynamik als Grundlage der Temperaturmessung allgemein Eingang fand, am nächsten kommt.

Die Skale des Gasthermometers würde mit der thermodynamischen zusammenfallen, wenn sein Gefäß ein vollkommenes Gas enthielte, das dem Boyle-Mariotteschen Gesetz streng folgte. Die natürlichen Gase zeigen jedoch mehr oder weniger große Abweichungen von diesem Gesetz und erfordern kleine Korrektionen, wie die folgende Betrachtung ergibt.

Für ein vollkommenes Gas ist das Produkt aus dem Druck p und dem Volumen v für jede Temperatur eine Konstante, d. h. die Isothermen, welche pv als Funktion von p darstellen, sind Gerade, welche der p-Achse parallel laufen. Die Isothermen der wirklichen Gase sind dagegen im allgemeinen gekrümmt, und beschränken wir uns auf das Gebiet kleiner Drucke, so weit sie für das Gasthermometer in Frage kommen,

jedoch nicht mehr parallel der p-Achse, sondern bilden mit ihr oberhalb des Siedepunkts des Gases zuerst einen stumpfen Winkel, der mit steigender Temperatur kleiner wird und dann in einen spitzen übergeht. Der Differentialquotient $d(vp)/dp$ ist also in tiefer Temperatur negativ, geht durch Null hindurch und nimmt in höherer Temperatur positive Werte an. In Fig. 62 sind zwei Isothermen M M′ und N N′ für die Temperaturen 0° und t° gezeichnet. Die Ordinate O′ N′ ist eine Isobare oder Linie gleichen Drucks p_0, die Gerade O M′ eine Isochore oder Linie gleichen Volumens v_0. Ferner ergeben sich für die Tangente des Neigungswinkels, für den Ausdehnungskoeffizienten α bei konstantem Druck und den Spannungskoeffizienten β bei konstantem Volumen:

$$\frac{d(vp)}{dp} = B_t = \frac{N'O' - ON}{OO'};\quad \alpha = \frac{1}{t}\frac{M'N'}{M'O'};\quad \beta = \frac{1}{t}\frac{M'N''}{M'O}.$$

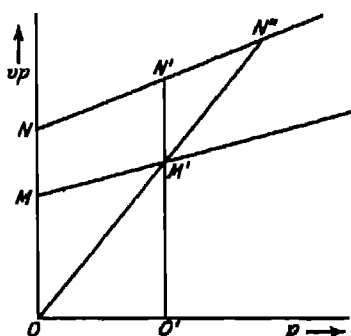



Fig. 62. Isothermen.

Mit abnehmendem Druck nähern sich Ausdehnungs- und Spannungskoeffizient beide dem Grenzwert: $\gamma = \frac{1}{t}\frac{MN}{MO}$.

Für die Temperaturskale sind willkürlich zu wählen der Anfangspunkt der Zählung und der Gradwert Als Anfangspunkt wird die normale Schmelztemperatur des Eises angenommen, und der Gradwert ist dadurch festgelegt, daß der Temperaturunterschied zwischen jenem Schmelzpunkt und dem normalen Siedepunkt 100 Grad betragen soll. Zur Vermeidung negativer Werte verlegt man den Nullpunkt um den reziproken Wert des Grenzwerts von Ausdehnungs- und Spannungskoeffizient nach unten: die Temperaturzahlen T in dieser Zählung heißen absolute. Da $1/\gamma = 273{,}2$, so ist $T = t + 273{,}2°$.

Für die Mittelwerte der Ausdehnungs- und Spannungskoeffizienten zwischen 0° und 100° und die Neigungen der Isothermen bei diesen Temperaturen bestehen, wenn kleine Größen höherer Ordnung vernachlässigt werden, die Beziehungen:

$$\frac{1 + 100\,\alpha_{100}}{1 + 100\,\gamma} = \frac{1 - p_0 B_0}{1 - \frac{273}{373}\,p_0 B_{100}},$$

$$\frac{1 + 100\,\beta_{100}}{1 + 100\,\gamma} = \frac{1 - p_0 B_0}{1 - p_{100} B_{100}}.$$

Aus diesen Gleichungen, in denen von den vier Größen α, β, B_0 und B_{100}

Aus den Angaben des Gasthermometers konstanten Drucks oder konstanten Volumens berechnet man die Temperatur t_p oder t_v auf Grund der Werte α_{100} und β_{100}. Zur Ableitung der entsprechenden Temperatur t in der thermodynamischen Skale hat man statt α_{100}, β_{100} und B_{100} die Werte α_t, β_t und B_t zu setzen und erhält für das Thermometer konstanten Drucks:

$$v = v_0 (1 + \alpha_{100} t_p) = v_0 (1 + \alpha_t t),$$

also

$$t - t_p = t \frac{\alpha_{100} - \alpha_t}{\alpha_{100}}$$

und entsprechend für die Korrektion des Thermometers konstanten Volumens auf die thermodynamische Skale:

$$t - t_v = t \frac{\beta_{100} - \beta_t}{\beta_{100}}.$$

Durch Einführung der Isothermenneigungen ergibt sich, wenn $1/\gamma = 273$ gesetzt wird und wiederum kleine Größen zweiter Ordnung vernachlässigt werden[1]),

$$t - t_p = 2{,}73\, p_0 \{ (100 - t) B_0 + t B_{100} - 100 B_t \},$$

$$t - t_v = p_0 \{ 2{,}73 (100 - t) B_0 + 3{,}73\, t B_{100} - (273 + t) B_t \}.$$

Die Tabelle auf S. 96 enthält die Werte der Korrektionen im Bereiche zwischen $-183 < t < 400°$ nach HOLBORN und OTTO[2]), weiter abwärts nach CATH und KAMERLINGH ONNES[3]). Die Zahlen wachsen durchweg mit der Siedetemperatur der Gase und sind im allgemeinen für das Thermometer konstanten Drucks größer als für dasjenige konstanten Volumens.

Als im Jahre 1885 eine Temperaturskale für die Maße der Meterkonvention aufgestellt wurde, wählte man zu ihrer Verwirklichung das Wasserstoffthermometer. Auf diese Weise hoffte man der thermodynamischen Skale am nächsten zu kommen. Denn Wasserstoff war von allen damals bekannten Gasen das vollkommenste. Tatsächlich bleiben die Korrektionen zwischen 0° und 100° für dieses Gas unterhalb 0,01°, einer Größe, die etwa der absoluten Genauigkeit des Gasthermometers innerhalb dieses Bereichs entspricht. Die Beobachtungen[4]) wurden im Internationalen Bureau angestellt und ihre Ergebnisse durch eine Reihe von Quecksilberthermometern aus Verre dur festgelegt, die den Kopien zugrunde gelegt wurden, mit denen das Bureau die Skale verbreitete.

[1]) F. HENNING, Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Temperaturmessung. Braunschweig 1915.

[2]) L. HOLBORN u. J. OTTO, ZS. f. Phys. 33, 10. 1925.

[3]) P. G. CATH u. H. KAMERLINGH ONNES, Comm. Leiden Nr. 156. 1922.

Korrektion des Gasthermometers auf die thermodynamische Skale für $p_0 = 1$ m Hg.

t	Thermometer konstanten Druckes					Thermometer konstanten Volumens				
	He	H_2	Ne	N_2	Ar	He	H_2	Ne	N_2	Ar
+450°	+0,012°	—	+0,066°	+0,67°	+0,67°	+0,061°	—	+0,017°	+0,19°	+0,09°
400	+0,010	—	+0,054	+0,55	+0,54	+0,046	—	+0,014	+0,15	+0,08
350	+0,008	—	+0,042	+0,43	+0,42	+0,034	—	+0,011	+0,11	+0,06
300	+0,006	—	+0,032	+0,32	+0,32	+0,023	—	+0,008	+0,08	+0,04
250	+0,004	+0,035°	+0,022	+0,225	+0,220	+0,015	+0,032°	+0,005	+0,050	+0,029
200	+0,002	+0,020	+0,013	+0,132	+0,128	+0,008	+0,017	+0,003	+0,027	+0,017
150	+0,001	+0,008	+0,006	+0,056	+0,054	+0,003	+0,007	+0,001	+0,011	+0,007
125	+0,000	+0,003	+0,003	+0,025	+0,024	+0,001	+0,003	0,000	+0,005	+0,003
75	0,000	−0,002	−0,001	−0,018	−0,018	−0,001	−0,001	0 000	−0,003	−0,002
50	0,000	−0,003	−0,002	−0,025	−0,024	−0,001	−0,002	0,000	−0,004	−0,003
25	0,000	−0,003	−0,001	−0,020	−0,019	−0,001	−0,001	0,000	−0,003	−0,002
− 25	+0,001	+0,007	+0,004	+0,039	+0,035	+0,001	+0,002	+0,001	+0,006	+0,006
− 50	+0,002	+0,016	+0,011	+0,112	+0,113	+0,003	+0,006	+0,002	+0,015	+0,015
−100	+0,005	+0,053	+0,040	+0,399	+0,409	+0,008	+0,015	+0,006	+0,052	+0,053
−150	+0,015	+0,138	+0,119	—	—	+0,014	+0,027	+0,016	—	—
−183	+0,029	+0,265	+0,259	—	—	+0,019	+0,039	+0,034	—	—
−200	—	—	—	—	—	+0,026	+0,078	+0,107	+0,67	
−250	—	—	—	—	—	+0,050	+0,178			

Versuche, die Skale oberhalb 100° fortzusetzen, sind fruchtlos geblieben, weil der Wasserstoff in höherer Temperatur auf Glas- und Porzellangefäße chemisch einwirkt und durch Metallwände diffundiert. Man hat sich deshalb des Stickstoffs bedient, mit dem sowohl mit Glas- als auch mit Porzellangefäßen befriedigende Ergebnisse von verschiedenen Beobachtern erzielt worden sind. Später stand alsdann durch die Entdeckung des Heliums ein Meßgas zur Verfügung, das in Metallgefäßen bis zu sehr hohen Temperaturen brauchbar und gleichzeitig als vollkommener in tiefer Temperatur dem Wasserstoff überlegen war. Mit Helium läßt sich also das ganze Temperaturbereich beobachten, das für das Gasthermometer in Frage kommt, wobei nur die Verwendung von Gefäßen aus Quarzglas nicht möglich ist, weil dieser Stoff für das Gas mit zunehmender Temperatur immer durchlässiger wird. Hier hat sonst das Gas wegen seiner Einatomigkeit noch den Vorzug, nicht der Dissoziation ausgesetzt zu sein.

2. Gasthermometer.

Das Gasthermometer wird beobachtet, indem man entweder das Volumen oder den Druck einer bestimmten abgeschlossenen Gasmenge konstant hält. An der schematischen Fig. 63 lassen sich beide Verfahren erklären. Bei dem ersten ist das Gas auf das Gefäß G und die Kapillare K beschränkt, welche das Gefäß mit dem Quecksilbermanometer M M′ verbindet, dessen beide Schenkel wie bei dem Barometer von Fuess in einem geschlossenen Quecksilberbehälter N münden oder bei einfacheren Instrumenten durch einen biegsamen Gummischlauch miteinander verbunden sind. Der Ansatz A an der Kapillare K mit den beiden kugelförmigen Erweiterungen K′, K″ dient zur Füllung des Gefäßes G mit dem Meßgas, welches durch den Hahn H′ eingelassen wird, nachdem das Gefäß mit der Quecksilberpumpe vollständig evakuiert und in hoher Temperatur getrocknet worden ist. Nach dem Eintritt des Gases

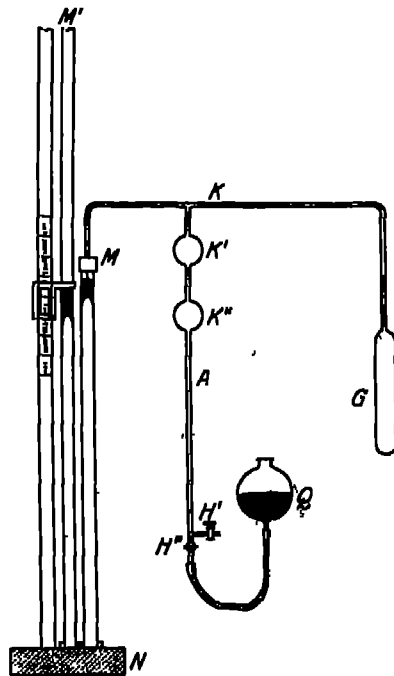



Fig. 63. Gasthermometer.

pillare A durch Heben des Behälters Q mit Quecksilber bis zur Kapillare K gefüllt. Der Hahn H″ wird alsdann wieder geschlossen, womit das Instrument zur Beobachtung vorbereitet ist.

Bezeichnet p_0 den Druck des Gases, wenn sich das Gefäß im schmelzenden Eis befindet, so gilt für den Druck p bei der Temperatur t unter der Voraussetzung, daß das Meßgas auf konstantem Volumen gehalten wird und β den mittleren Spannungskoeffizienten zwischen 0° und 100° bezeichnet:

$$p = p_0(1 + \beta t) \qquad \text{oder} \qquad t = \frac{p - p_0}{\beta p_0} = 100\,\frac{p - p_0}{p_{100} - p_0}.$$

Diese Gleichung gilt unter der Bedingung, daß das Gas bei der Erwärmung nicht allein sein Volumen beibehält, sondern daß sich dieses Volumen auch in seiner ganzen Ausdehnung auf der Temperatur t befindet. Beide Annahmen treffen nicht streng zu. Denn einerseits dehnt sich das Gefäß G mit der Temperatur aus, andererseits bleibt ein Teil des Gases, nämlich soweit es die Kapillare K füllt, auf Zimmertemperatur. Bezeichnet man ihr Volumen, „das schädliche Volumen", mit v_s, ihre Temperatur mit t_s, ferner mit k den kubischen Ausdehnungskoeffizienten des Gefäßes, mit v_0 sein Volumen bei 0° und mit s_0 die Dichte des Gases bei 0° und 760 mm Quecksilber, so wird die Masse des Gases ausgedrückt

bei 0° und p_0 durch und bei t° und p durch

$$\frac{s_0 p_0}{760}\left(v_0 + \frac{v_s}{1 + \beta t_s}\right); \qquad \frac{s_0 p}{760}\left(\frac{v_0(1 + kt)}{1 + \beta t} + \frac{v_s}{1 + \beta t_s}\right).$$

Beide Ausdrücke sind gleich, und es folgt daraus, wenn $v_s/v_0 = m$ gesetzt wird:

$$p_0(1 + \beta t)\left(1 + \frac{m}{1 + \beta t_s}\right) = p\left(1 + kt + m\frac{1 + \beta t}{1 + \beta t_s}\right) \text{ oder}$$

$$t\left(\beta p_0 - \gamma p - \frac{m\beta}{1 + \beta t_s}(p - p_0)\right) = (p - p_0)\left(1 + \frac{m}{1 + \beta t_s}\right).$$

Man übersieht leicht, wie die Gleichung abzuändern ist, wenn die Temperatur t_s nicht konstant bleibt.

Ist sie ferner, wie gewöhnlich, über die Kapillare ungleichmäßig verteilt, so muß man die verschieden temperierten Teile einzeln betrachten oder eine Mitteltemperatur für das Ganze einführen. Das Gefäß kann sich außer durch die Temperatur auch noch durch die Zunahme des Drucks etwas dehnen. Doch wird die Gefäßwandung zweckmäßig so stark gewählt, daß diese elastische Dehnung keine merklichen Beiträge annimmt, da die Änderung der elastischen Konstanten namentlich bei großem

Die Drucke p_0 und p werden als Quecksilberhöhen mit dem Kathetometer oder mittels Visier an einem neben dem Manometer aufgestellten Maßstab bestimmt; man bezieht sie auf eine Mitteltemperatur des Beobachtungsraumes, da nur ihr Verhältnis in die Rechnung eingeht. Ist das Manometer offen, so ist bei jeder Ablesung noch der Barometerstand zu berücksichtigen. Man macht sich hiervon frei, wenn im zweiten Manometerschenkel M′ über der Quecksilberkuppe ein Vakuum mit einer Quecksilberpumpe erhalten wird. Der andere Schenkel M wird nach CHAPPUIS' Vorgang oben durch eine ebene Metallkappe abgeschlossen, die eine kurze Spitze trägt, auf welche sich die Quecksilberkuppe einstellen läßt. Dadurch wird der schädliche Raum kleiner gehalten, als wenn das Glasrohr allmählich in die Kapillare übergeführt würde

Für das Verfahren des konstanten Drucks macht man Gebrauch von den Erweiterungen K′, K″ . . . der Kapillare A, in die man das Meßgas unter Senken des Quecksilbers mittels des Behälters Q während der Erwärmung des Gefäßes G übertreten läßt (Fig. 63). Es bezeichne v das Volumen der Erweiterungen, soweit sie mit dem Gase gefüllt sind; sie sollen stets auf 0° gehalten werden und mit Quecksilber gefüllt sein, wenn sich das Gefäß G auf 0° befindet. Man wird die Beobachtungstemperaturen t immer so wählen, daß das ausgetretene Gas gerade eine Anzahl von Erweiterungen ganz füllt, da alsdann das Volumen v am genauesten bestimmt ist oder man kann bei Verwendung nur einer Erweiterung das verdrängte Quecksilber auffangen und wägen. Für die Temperatur t erhält man durch eine ähnliche Schlußfolgerung wie bei dem Thermometer konstanten Volumens:

$$t = \frac{1}{\alpha} \frac{v}{v_0 - v}.$$

Unter Berücksichtigung des Ausdehnungskoeffizienten k des Gefäßes geht die Gleichung über in:

$$t\left(\alpha - k - \alpha \frac{v}{v_0}\right) = \frac{v}{v_0}.$$

Um die Empfindlichkeit des Verfahrens zu prüfen, bedienen wir uns der vereinfachten Gleichungen und beziehen sie auf die absolute Temperatur. Dann ist

für konstantes Volumen	für konstanten Druck
$T = \frac{1}{\beta} \frac{p}{p_0};$	$T = \frac{1}{\alpha} \frac{v_0}{v_0 - v};$
$\frac{dp}{dT} = \beta p_0;$	$\frac{dv}{dT} = \frac{v_0}{\alpha T^2}.$

Im ersten Falle ist also die Empfindlichkeit, d. h. der Druckzuwachs pro Grad, konstant und proportional dem Anfangsdruck p_0, im zweiten nimmt der Volumenzuwachs des ausgetretenen Gases, bezogen auf 1°, mit dem Quadrat der absoluten Temperatur ab.

In anderer Hinsicht ist das Thermometer konstanten Drucks günstiger, nämlich der Einfluß des schädlichen Raumes ändert sich wenig mit der Temperatur, während er bei konstantem Volumen, wo er von dem Verhältnis m abhängt, proportional der absoluten Temperatur zunimmt. Dasselbe gilt für den Ausdehnungskoeffizienten des Gefäßes. Da man den schädlichen Raum nicht beliebig verkleinern kann — den Durchmesser der Verbindungskapillare K wählt man zweckmäßig eines guten Druckausgleichs halber nicht unter 0,7 mm und die Weite des Manometerrohrs wegen der Kapillarität des Quecksilbers nicht unter 15 mm — so bleibt nichts anderes übrig, als zur Erreichung einer ausreichenden Genauigkeit das Gefäß G groß zu wählen, etwa 150—200 ccm. Sein Volumen sowohl wie das des schädlichen Raumes werden durch Auswägung mit Quecksilber bestimmt. Letzterer läßt sich auch, wenn eine Erweiterung K von passender Größe in der Zuleitungskapillare A vorgesehen ist, volumetrisch ermitteln.

Die Grundlage für die Messungen mit dem Gasthermometer bildet die Bestimmung des mittleren Ausdehnungs- oder des Spannungskoeffizienten zwischen 0° und 100°. Es liegt für die gebräuchlichen Gase eine große Anzahl solcher Messungen vor, deren Übereinstimmung, an einem strengen Maßstab gemessen, allerdings noch zu wünschen übrig läßt. HENNING und HEUSE[4]), auf deren Arbeit wir wegen der älteren Literatur verweisen, fanden folgende Werte in Abhängigkeit von dem Druck p_0, der für konstantes Volumen den Anfangsdruck bei 0° bezeichnet und für konstanten Druck unverändert bleibt:

für Helium $\begin{cases} 10^7 \cdot \alpha = 36\,604 - 10\,p_0, \\ 10^7 \cdot \beta = 36\,604 - 4\,p_0; \end{cases}$

für Wasserstoff $\begin{cases} 10^7 \cdot \alpha = 36\,604 - 12\,p_0, \\ 10^7 \cdot \beta = 36\,604 + 17\,p_0; \end{cases}$

für Stickstoff $\begin{cases} 10^7 \cdot \alpha = 36\,604 + 127\,p_0, \\ 10^7 \cdot \beta = 36\,604 + 134\,p_0. \end{cases}$

Alle Koeffizienten nähern sich mit abnehmendem Druck p_0 einem Grenzwert $\gamma \cdot 10^7 = 36\,604$, der dem idealen Zustande zukäme. Er ist etwas kleiner, als er von älteren Autoren angegeben wird, die $\gamma \cdot 10^7 = 36\,618$ fanden. Die Genauigkeit der Messungen läßt sich danach beurteilen, daß eine einzelne Beobachtung den Temperaturunterschied zwischen 0° und 100° auf etwa 0,01°, also auf $1 \cdot 10^{-4}$ ergibt.

[4]) F. H[illegible]

Messungen mit dem Gasthermometer reichen nach oben bis 1600°[5]); die Ergebnisse verschiedener Beobachter zeigen in den höchsten Temperaturen noch Unterschiede über 10°; die Übereinstimmung bis auf etwa 1° reicht bis etwa 1200°. Diese Messungen wurden meist mit dem Thermometer konstanten Volumens ausgeführt und benutzten oberhalb der Grenze, wo Gefäße aus Glas aufhören, solche aus Platiniridium oder Platinrhodium. Weil diese für Heizgase durchlässig sind, waren sie früher bei der Heizung in Gasöfen aufgegeben und durch Porzellangefäße ersetzt. Später wurden die Metallgefäße mit der Anwendung der elektrischen Heizung wieder eingeführt[6]).

Früher wurde das Gasthermometer viel bei physikalischen Messungen benutzt. Es hat dies aufgehört, seitdem für alle Temperaturbereiche bequemere Gebrauchsthermometer vorliegen. Infolge davon wird das Gasthermometer nur noch in wenigen Laboratorien angewandt, wo es sich darum handelt, die Grundlagen für die Temperaturskale festzulegen. So beruht diese z. B. für den Bereich unter 0° auf den Messungen der P.-T. Reichsanstalt[7]) und des Leidener Kältelaboratoriums. Sie beziehen sich teils auf das Wasserstoff-, teils auf das Heliumthermometer, welches bis auf wenige Grad an den absoluten Nullpunkt durchgeführt ist.

Fig. 64. Differential-Gasthermometer.

Zur Beobachtung der Unterschiede in den Angaben verschiedener Gasthermometer wurde in dem letzteren Laboratorium[8]) ein Differentialinstrument konstruiert (Fig. 64), in dem zwei gleiche Gefäße, mit verschiedenen Gasen gefüllt, gleichzeitig in das Temperaturbad getaucht werden. Das eine G_1 ist in gewöhnlicher Weise mit dem Manometer verbunden, während das andere G_2 an zwei beweglichen Schenkeln A_1 und B

[5]) L. Holborn u. S. Valentiner, Ann. Phys. 22, 1. 1907. A. Day u. R. Sosman, Am. Journ. of Sc. 29, 93. 1910.

[6]) L. Holborn u. A. Day, Ann. Phys. 2, 505. 1900.

[7]) F. Henning u. W. Heuse, ZS. f. Phys. 6, 215. 1921; 23, 95 u. 105. 1924.

[8]) P. G. Cath u. H. Kamerlingh Onnes, Comm. Leiden Nr. 150. 1922. Die

liegt, da die Verbindung durch eine bewegliche Glasfeder vermittelt wird. Das Vakuum über dem gemeinschaftlichen Schenkel B wird durch Holzkohle D aufrechterhalten, die durch flüssige Luft gekühlt wird.

3. Gesetzliche Temperaturskale.

Zur Festlegung der Temperaturskale dienen eine Reihe von Fixpunkten, meistens Schmelz- und Siedepunkte reiner Stoffe, sowie einige Umwandlungstemperaturen, die mit aller Schärfe beobachtet worden können. Diese Punkte werden dann zur Eichung der Gebrauchsthermometer verwandt. Außerdem sind einige von diesen Thermometern in größeren Bereichen an das Gasthermometer angeschlossen, so daß sie zur Interpolation zwischen den Fixpunkten zu benutzen sind.

Sowohl über diese wie über die zur Interpolation geeigneten Gebrauchsthermometer besteht eine weitgehende Übereinstimmung der verschiedenen Beobachter, die bald eine internationale Vereinbarung erwarten läßt. In Deutschland, wo durch das Gesetz vom 7. August 1924 die hundertteilige thermodynamische Temperaturskale eingeführt worden ist, hat die Reichsanstalt diese zu verwirklichen. Nach ihrer Bekanntmachung vom 20. September 1924 gelten hierfür die folgenden Bestimmungen:

„Die Temperatur t wird gemessen:

1. zwischen — 193° und dem Schmelzpunkt des Eises durch den Widerstand R eines reinen Platindrahts nach der Beziehung

$$R_t = R_0 (1 + a_1 t + b_1 t^2 + c_1 t^4),$$

deren Konstanten R_0, a_1, b_1 und c_1 durch Eichung des Platindrahts bei dem Siedepunkt des Sauerstoffs:

$$t = -183{,}00^\circ + 0{,}0126\,(p - 760) - 0{,}0000065\,(p - 760)^2$$

(wobei p hier wie in den folgenden Formeln des Sättigungsdruck zwischen 680 und 780 mm Quecksilbersäule bedeutet),

dem Sublimationspunkt der Kohlensäure:

$$t = -78{,}50^\circ + 0{,}01595\,(p - 760) - 0{,}000011\,(p - 760)^2,$$

dem Schmelzpunkt des Quecksilbers. $t = -38{,}87^\circ$ und dem Schmelzpunkt des Eises: $t = 0{,}000^\circ$ bestimmt sind;

2. zwischen dem Schmelzpunkt des Eises und dem Erstarrungspunkt des Antimons

durch den Widerstand R eines reinen Platindrahtes nach der Beziehung

deren Konstanten R_0, a_2 und b_2 durch Eichung des Platindrahts bei dem Schmelzpunkt des Eises: $t = 0{,}000°$, dem Siedepunkte des Wassers.

$$t = 100{,}000° + 0{,}0367\,(p - 760) - 0{,}000\,023\,(p - 760)^2$$

und dem Siedepunkt des Schwefels

$$t = 444{,}00° + 0{,}0909\,(p - 760) - 0{,}000\,048\,(p - 760)^2$$

bestimmt sind;

3. zwischen dem Erstarrungspunkt des Antimons und dem Schmelzpunkt des Goldes

durch die elektromotorische Kraft e eines Thermoelements aus reinem Platin gegen eine Legierung von Platin mit 10 v. H. Rhodium unter der Bedingung, daß sich die eine Lötstelle auf der Temperatur t°, die andere auf der Temperatur des schmelzenden Eises befindet, nach der Beziehung

$$e = a_3 + b_3 t + c_3 t^2 + d_3 t^3;$$

die Konstanten a_3, b_3, c_3 und d_3 werden durch Eichung des Thermoelements bei dem Erstarrungspunkt des Zinkes und dem Erstarrungspunkt des Antimons, deren Temperatur nach der Vorschrift unter 2. zu ermitteln ist, ferner bei dem Erstarrungspunkt des Silbers: $t = 960{,}5°$ und dem Schmelzpunkt des Goldes · $t = 1063°$ bestimmt;

4. oberhalb des Schmelzpunktes des Goldes durch das bei der Wellenlänge λ des sichtbaren Lichtes beobachtete Helligkeitsverhältnis H_t/H_{Au} des schwarzen Körpers nach der Beziehung

$$\ln \frac{H_t}{H_{Au}} = \frac{c}{\lambda}\left[\frac{1}{t_{Au} + 273} - \frac{1}{t + 273}\right],$$

deren Konstanten $t_{Au} = 1063°$ und $c = 1{,}43$ cm · Grad gesetzt werden.

5. Zusätze.

a) Neben den vorstehenden Fixpunkten, durch welche die gesetzliche Temperaturskale festgelegt wird, können für die Messung außerdem noch folgende Fixpunkte zweiter Ordnung dienen:

Umwandlungspunkt von Natriumsulfat 32,38°,

Siedepunkt von Naphthalin $217{,}9_6° + 0{,}058\,(p - 760)$ für Drucke zwischen p = 750 und 760 mm,

Erstarrungspunkt von Zinn $231{,}8_5°$,

Siedepunkt von Benzophenon $305{,}9° + 0{,}063\,(p - 760)$ für Drucke zwischen p = 750 und 760 mm,

Erstarrungspunkt von Kadmium 320,9°,

Erstarrungspunkt von Antimon 630,5°,
Erstarrungspunkt von Kupfer 1083°,
Schmelzpunkt von Palladium 1557°,
Schmelzpunkt von Platin 1770°,
Schmelzpunkt von Wolfram 3400°.

b) Die Eichung des Platindrahts zwischen — 193° und dem Schmelzpunkt des Eises kann dadurch vereinfacht werden, daß für die Konstante c_1 der Wert $-5 \cdot 10^{-12}$ gesetzt wird. Die Eichung am Sublimationspunkt der Kohlensäure fällt alsdann weg.

6. Erläuterungen.

a) Der normale Schmelzpunkt des Eises und der normale Siedepunkt des Wassers beziehen sich, ebenso wie alle andern Schmelz- und Erstarrungspunkte, auf den Druck der normalen Atmosphäre von 760 mm Quecksilbersäule, gemessen bei der Dichte 13,595 g/cm³ und der Schwerebeschleunigung 980,665 cm/sec²

b) Das zu Widerstandsthermometern verwendete Platin muß einen solchen Grad von Reinheit besitzen, daß der Quotient $R_t : R_0$ am normalen Siedepunkt des Sauerstoffs kleiner als 0,250, am normalen Siedepunkt des Wassers größer als 1,390 und am normalen Siedepunkt des Schwefels größer als 2,645 ist.

c) Das Thermoelement muß so beschaffen sein, daß seine elektromotorische Kraft am Goldschmelzpunkt zwischen den Werten 10 200 und 10 400 Mikrovolt gelegen ist.

d) Der Wert $\lambda \cdot (t + 273)$ unter 4. muß kleiner als 0,3 cm · Grad sein."

4. Flüssigkeitsthermometer.

Seit Fahrenheit (1726) statt des Alkohols Quecksilber zur Füllung von Ausdehnungsthermometern allgemein einführte, haben diese Instrumente unter allen die größte Bedeutung gewonnen, einerseits wegen des großen Temperaturbereichs, das sie umfassen, andererseits wegen der Bequemlichkeit ihrer Handhabung. Ihre Genauigkeit hat stetig durch die Fortschritte zugenommen, welche die Hersteller in ihrer Kunst machten, besonders als ihnen seit 1885 nachwirkungsfreie Gläser zu Gebote standen. Vorher hatte man in dem Bestreben, den Instrumenten ein schönes Aussehen zu verleihen, die thermische Nachwirkung des Glases zu wenig beachtet. Sie hängt ab von dem chemischen Gehalt an Alkali, insofern als Gläser mit einem Gehalt an Natron und Kali große Nachwirkung, Gläser mit einem Alkali dagegen geringe aufweisen. Auf Grund

gewonnen wurde, hat das Jenaer Glaswerk von Schott & Genossen Thermometergläser hergestellt, von denen Nr. 16 III und 59 III besonders in Aufnahme gekommen sind.

Man unterscheidet Stab- und Einschlußthermometer. Die erste Form besitzt eine Kapillare etwa von der Dicke des Gefäßes, welche zugleich die Teilung trägt, während die zweite eine sehr dünnwandige Kapillare aufweist, welche auf einer besonderen Skale aus Milchglas, Aluminiumblech, Papier usw. aufliegt und mit dieser zusammen durch eine besondere Glashülle geschützt wird. Diese Form läßt sich bequemer ablesen, es genügt dazu äußerstenfalls eine Lupe, mit der sich auch die Parallaxe vermeiden läßt, während das Stabthermometer besser mit dem Fernrohr beobachtet wird, wenn die Striche nicht über die Hälfte des Stabumfanges gezogen sind.

Thermometer für niedrige Temperaturen werden luftfrei gefüllt; die Luft wird durch das zum Sieden gebrachte Quecksilber vor dem Zuschmelzen entfernt. In höherer Temperatur haben solche luftfreien Instrumente den Nachteil, daß Teile des Fadens nach oben abdestillieren, wenn die Kapillare nicht in ihrer ganzen Länge in das Temperaturbad eintaucht. Man führt deshalb oft ein indifferentes Gas, z. B. Stickstoff, in die Kapillare ein, welches das Quecksilber zwar zusammenhält, aber eine nachherige Kalibrierung natürlich verhindert. Für die Messung der Temperaturen, welche den Siedepunkt des Quecksilbers übersteigen, muß das Gas unter höherem als dem Sättigungsdruck stehen. Zur Zeit werden solche Thermometer unter Verwendung von Quarzglas angefertigt, die bis 700° gebraucht werden können, in denen der Gasdruck über 50 Atm. betragen muß. Solche unter Druck gefüllte Instrumente werden vielfach vor dem Zuschmelzen erst mit Schellack verkittet; zweckmäßiger ist es, sie ohne Kittung in einer Druckkammer elektrisch zu verschmelzen.

Durch die Wahl des Verhältnisses zwischen Gefäßgröße und Kapillarenweite kann man die Empfindlichkeit des Thermometers stark verändern; eine Grenze ist jedoch dadurch gesetzt, daß große Gefäße die Temperatur nur langsam annehmen und leicht elastische Deformationen erleiden, sowie daß in sehr engen Kapillaren die stetige Bewegung des Fadens durch die Kapillarität gehindert wird, so daß selbst mit Klopfen kein regelmäßiger Gang zu erhalten ist.

Damit empfindliche Thermometer nicht unhandlich lang werden, richtet man sie nur für einen kleinen Temperaturbereich ein und schaltet Erweiterungen in die Kapillare ein, wo die Meßstrecke unterbrochen werden kann. Fig. 65 zeigt eine solche Anordnung an einem Einschluß-

Auch kann für Differentialthermometer die Quecksilbermenge vo änderlich gemacht werden, indem ein Teil davon nach Belieben in eir Erweiterung gebracht wird, welche zu diesem Zweck an dei oberen Ende der Kapillare vorgesehen ist. Dieser Gedank wurde zuerst von WALFERDIN (1836) ausgeführt, welch die gewöhnliche birnförmige Erweiterung der Kapillare daz benutzte. Den Zweck erreichte jedoch BECKMANN (1888 besser, indem er die Erweiterung als Schleife ausbildete, di sowohl das Abtrennen des Quecksilbers erleichtert, als auc das unfreiwillige Zurückfallen verhindert (Fig. 66a). Di durch Erwärmen aus der Kapillare getriebene Flüssigkei fällt nicht von selbst ab, sondern wird durch Klopfen in di Erweiterung abgeschlagen, indem man das Thermometer i der einen Hand hält. Ebenso leicht läßt sich das Quecksil ber, gegebenenfalls nach Erwärmen des Hauptgefäßes, durc Abkühlen wieder vereinigen. Die Schleife wird auch mi einer Teilung versehen, um eine bestimmte Quecksilber menge bequemer abzutrennen. Man bringt zu diesem Zwec das ganze zusammenhängende Quecksilber durch passend Erwärmung auf ein solches Volumen, daß die Kuppe a der Skale der Erweiterung auf der jenigen Temperatur, z. B. 20°, steht die man messen will, und schlägt di an der Kapillare hängende Menge au den Boden der Schleife ab. Nach den Abkühlen auf 20° stellt sich dan die Kuppe in die Mitte der Kapillar ein. SIEBERT & KÜHN ziehen di Kapillare in eine feine Spitze aus, welche in die Erweiterung hineinragt, so daß man das Quecksilber in Tröpfchen übertreten lassen kann (Fig. 66 b).

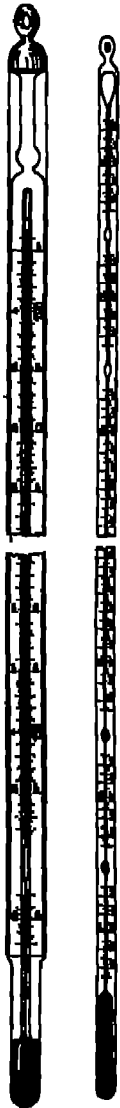



Fig. 65 Einschluß-Stabthermometer

Fig. 66a Fig. 66b. BECKMANN-Thermometer.

Die Skale des Thermometers hängt natürlich von der Ausdehnung des Quecksilbers im Glase ab und ist deshalb für jede Glassorte besonders zu bestimmen. Zu diesem Zweck ist das Thermometer, nachdem der Gradwert durch die Festlegung von Eis- und Siedepunkt bestimmt

Mutterteilungen für Quecksilberthermometer*).

t	Jenaer Gläser 16III	Jenaer Gläser 59III	Jenaer Gläser Verbrennungsröhren	Gege-Eff-Glas (Ilmenau)	t	Jenaer Gläser 59III	Jenaer Gläser Verbrennungsröhren	Gege-Eff-Glas (Ilmenau)
− 30°	− 30,28°	− 30,13°	—	—	340°	347,2°	347,8°	344,3°
− 20	− 20,16	− 20,07		—	350	358,0	358,6	354,9
− 10	− 10,07	− 10,03	—	—	360	368,8	369,5	365,5
0	0,00	0,00	0,00°	0,00°	370	379,7	380,4	376,1
+ 10	+ 10,00	+ 10,02	—	+ 10,05	380	390,6	391,4	386,8
20	20,00	20,04	—	20,09	390	401,6	402,4	397,5
30	30,11	30,04	—	30,11	400	412,6	413,5	408,2
40	40,12	40,03	—	40,11	410	423,7	424,7	419,0
50	50,12	50,03	—	50,11	420	434,9	435,9	430,0
60	60,10	60,02	—	60,10	430	446,1	447,2	441,1
70	70,08	70,01	—	70,08	440	457,4	458,6	452,3
80	80,06	80,00	—	80,05	450	468,8	470,0	463,7
90	90,03	89,98	—	90,02	460	480,2	481,5	—
100	100,00	100,00	100,00	100,00	470	491,7	493,1	—
110	109,98	110,02	—	110,0	480	503,3	504,8	—
120	119,97	120,05	—	120,0	490	515,0	516,6	—
130	129,97	130,10	—	129,9	500	526,9	528,4	—
140	139,98	140,16	—	139,9	510	—	540	—
150	149,99	150,23	—	149,9	520	—	552	—
160	160,02	160,31	—	159,9	530	—	564	—
170	170,07	170,40	—	170,0	540	—	577	—
180	180,12	180,52	—	180,1	550	—	589	—
190	190,19	190,66	—	190,2	560	—	601	—
200	200,29	200,84	201,13	200,3	570	—	—	—
210	210,4	211,0	211,4	210,4	580	—	—	—
220	220,5	221,3	221,6	220,5	590	—	—	—
230	230,7	231,6	231,9	230,6	600	—	—	—
240	240,9	241,9	242,2	240,8	610	—	—	—
250	251,1	252,2	252,6	250,9	620	—	—	—
260	261,4	262,6	263,0	261,1	630	—	—	—
270	271,7	273,0	273,5	271,3	640	—	—	—
280	282,0	283,4	284,0	281,6	650	—	—	—
290	292,4	293,9	294,5	292,0	660	—	—	—
300	302,7	304,4	305,1	302,4	670	—	—	—
310	—	315,1	315,7	312,8	680	—	—	—
320	—	325,8	326,4	323,3	690	—	—	—
330	—	336,5	337,1	333,8	700	—	—	—

*) L. Holborn, K. Scheel u. F. Henning, Wärmetabellen der P.-T. Reichs-

anderweitig bekannten Normal auf die Celsius-Skala zu beziehen. Für die gebräuchlichen Gläser stellt die obige Tabelle die Teilung dar, wobei als Einheit der Gradwert, d. h. der hundertste Teil des Abstandes zwischen Eis- und Siedepunkt, gilt. Die Zahlen setzen Gleichmäßigkeit des Kapillarquerschnittes voraus. Andernfalls müssen die Kaliberkorrektionen vorher angebracht werden. Bei der Herstellung der Teilungen wird die Kaliberverteilung auf besondern Teilmaschinen vielfach vorher eingestellt, so daß ohne Rücksicht auf die Ungleichmäßigkeit automatisch geteilt werden kann.

Auf den Stand des Thermometers wirkt der innere Druck der Füllung, der gewöhnlich in die Eichung mit hineingenommen wird, wenn das Instrument immer in vertikaler Stellung benutzt wird. Er macht sich aber bei einem Wechsel der Lage bemerkbar; der Unterschied zwischen vertikaler und horizontaler beträgt etwa 0,001 1°, wenn der Faden 1 cm lang ist. Ebenso ist der Einfluß des äußeren Drucks zu berücksichtigen, wenn das Thermometer verschieden tief in Bäder eintaucht.

Wird die Teilung nach den angegebenen Vorschriften ausgeführt, so zeigt sie bei einer nachträglichen Vergleichung des Thermometers mit einem Normalinstrument nur geringe Abweichungen, die daher rühren, daß verschiedene Schmelzen derselben Glassorte immerhin noch kleine Unterschiede aufweisen. Auch wird dasselbe Glas durch die Behandlung verändert, wie sich daran zeigt, daß besonders Thermometer, in deren Kapillaren Erweiterungen angebracht sind, solche Abweichungen zeigen.

Jedes frisch geblasene Thermometerrohr hat die jahrelang dauernde Neigung, sich zusammenzuziehen; infolgedessen steigt der Eispunkt. Um diese Veränderlichkeit zu beseitigen, werden die Thermometer vor dem Aufbringen der Teilung künstlich gealtert, indem sie längere Zeit bis zur Fließgrenze des Glases erhitzt und dann langsam abgekühlt werden. Dieses Verfahren ist für eine gute Haltbarkeit und dauernde Richtigkeit der Instrumente um so notwendiger, je höher die Gebrauchstemperatur liegt.

Von diesen säkularen Nachwirkungen des Glases sind die vorübergehenden zu unterscheiden, die unmittelbar nach jeder Erwärmung auftreten und die eine Depression des Eispunktes bewirken, die am folgenden Tag verschwunden ist. Sie ist bei guten Thermometergläsern nur gering, bei Jenaer Glas 16 III beträgt sie 0,04°, bei Glas 59 III nur 0,03° nach einer Erwärmung auf 100°. Man beobachtet wegen dieser Erscheinung den Eispunkt vor dem Siedepunkt.

Pernet (1875) begründete darauf ein besonderes Beobachtungsverfahren, indem er nicht den Nullpunkt nach längerer Ruhe benutzte,

und dem unmittelbar darauf abgelesenen „maximal deprimierten" Eispunkt ansah und entsprechend jede andere Temperatur von dem sofort danach bestimmten Eispunkte rechnete

Die Unveränderlichkeit eines Thermometers wird am schärfsten am Eispunkt geprüft, weshalb dieser auch auf hochgradigen Thermometern vermerkt wird, die eigentliche Teilung folgt dann auf eine Erweiterung der Kapillare.

Ist es auf dem Thermometer nicht anders vermerkt, so gilt die Teilung unter der Voraussetzung, daß sich das ganze Quecksilber, also Gefäß und Faden, auf der zu messenden Temperatur befindet. Ragt trotzdem ein Teil des Fadens von der Länge 1° aus dem warmen Bade in die kältere Umgebung, so zeigt das Instrument zu tief. zu der Ablesung t ist alsdann $\varepsilon l (t - t_0)$ hinzuzufügen, wo t_0 die mittlere Temperatur des herausragenden Fadens und ε die scheinbare Ausdehnung des Quecksilbers im Glase bedeutet. Für Glas 16 III kann ε zu 0,000 158, für 59 III zu 0,000 104 angenommen werden Die Temperatur t_0 kann näherungsweise mit einem Thermometer gemessen werden, dessen Gefäß in halber Höhe des herausragenden Fadens angebracht ist. Genauer mißt man mit einem Fadenthermometer (Mahlke 1893) [10]). Dieses Instrument besitzt ein langes Gefäß, dessen Querschnitt gleich demjenigen der Kapillare des Hauptthermometers ist, und eine viel engere Kapillare und wird so aufgestellt, daß sich das obere Ende seines Gefäßes etwas unterhalb der Quecksilberkuppe des Hauptthermometers befindet, während das untere Ende in das Bad eintaucht. Die Ablesung gibt dann die mittlere Temperatur eines Fadens, der so lang wie das Gefäß ist

Bei Instrumenten, mit denen man den höchsten Stand messen und festhalten will, z. B. bei den Fieberthermometern und bei gewissen meteorologischen Geräten, verengert man die Kapillare oberhalb des Gefäßes; das Quecksilber reißt dann beim Fallen der Temperatur an dieser Stelle ab, der obere Faden bleibt stehen und wird nach der Ablesung durch Schleudern mit dem übrigen Quecksilber wieder vereinigt. Die Verengerung wird dadurch hergestellt, daß man bei Stabthermometern die Kapillare im Gebläse zusammenfallen läßt, während man in die dünnwandige Kapillare der Einschlußthermometer einen konischen Glasstift einführt. Auch die Tiefseethermometer besitzen eine solche Verengerung, an denen der Faden abreißt, wenn das Instrument umgekippt wird, was durch eine besondere Vorrichtung vom Meßschiff aus geschehen kann, wo nach dem Hinaufziehen die Länge des abgerissenen Fadens abgelesen wird. Die Thermometer sind durch eine Glashülle gegen den Druck des

[10]) J. Adam, ZS. f. Instr. 1907, 101. — E. Buckingham, Bull. Bur. Stand. 8,

Meerwassers geschützt. Will man jedoch außer der Temperatur auch die Tiefe des Meeres messen, so läßt man noch ein zweites Thermometer hinab, das dem Wasserdruck ausgesetzt wird. Ein Überdruck von 10 Atm. also 100 m Wasserhöhe, ändert den Stand um etwa 0,1° bei den gebräuchlichen Formen.

Für Temperaturen, die unter den Gefrierpunkt des Quecksilbers fallen, füllt man die Thermometer mit Alkohol oder besser mit Toluol; sie reichen dann bis etwa − 100°. Für noch tiefere Temperaturen sind nur Petroläther (bei 30° destilliert) oder technisches Pentan brauchbar, die noch Messungen in flüssiger Luft gestatten, während chemisch reines Pentan dann schon fest wird. Gegenüber dem Quecksilber haben alle diese Flüssigkeiten den Nachteil, daß sie die Kapillare benetzen, weshalb besondere Vorsicht bei der Abkühlung der Thermometer angebracht ist, damit der Faden nicht zerreißt und zuviel Flüssigkeit an der Wandung hängen bleibt. Die Skale dieser Thermometer ist nach der Tabelle anzufertigen, wo als Einheit der 78,5ste Teil des Abstandes von 0° bis − 78,5° gilt.

Mutterteilung von Pentan-, Toluol- und Alkoholthermometern aus Jenaer Glas 16III.

t	Pentan	Toluol	Alkohol	t	Pentan	Toluol	Alkohol
− 200°	− 174,2°	—	—	− 70°	− 71,0°	− 70,4°	− 70,3°
− 190	− 166,6	—	—	− 60	− 62,0	− 60,8	− 60,0
− 180	− 159,0	—	—	− 50	− 52,6	− 51,1	50,7
− 170	− 151,4	—	—	− 40	− 43,0	− 41,2	− 40,0
− 160	− 143,8	—	—	− 30	− 32,9	− 31,2	− 30,0
− 150	− 136,1	—	—	− 20	− 22,4	− 21,0	− 20,8
− 140	− 128,4	—	—	− 10	− 11,5	− 10,0	10,5
− 130	− 120,6	—	—	0	0,0	0,0	0,0
− 120	− 112,7	—	—	+ 10	+ 12,0	—	—
− 110	− 104,7	—	—	+ 20	+ 24,4	—	—
− 100	− 96,6	—	—	+ 30	+ 37,6	—	+ 33,6
− 90	− 88,3	—	—	+ 100	—	+ 124,4	
− 80	− 79,8	—	—				
− 78,5	− 78,5	− 78,5	− 78,5				

Für höhere Temperaturen kann die Füllung mit ähnlichen Flüssigkeiten bei großen Instrumenten in Frage kommen, die auf weite Entfernung abgelesen werden sollen. Hierzu eignen sich z. B. Kumol, Methylbenzoat und Amylbenzoat, die bei etwa 150°, 200° und 260° sieden und bis nahe an ihren Siedepunkt brauchbar sind. Der bessern Ablesbarkeit wegen färbt man diese Flüssigkeiten mit Asphalt[11]).

Für viele Thermometer genügt es, sie an mehreren Punkten mit bekannten Normalinstrumenten zu vergleichen. Für diese selbst sowie für genaue Kalorimeter- oder Beckmann-Thermometer bedarf es einer eingehenden Kalibrierung der Kapillare, die an luftfreien Instrumenten nach der Füllung, an anderen vorher vorgenommen wird

Zu diesem Zweck wird in dem Rohr ein Quecksilberfaden verschoben und seine Länge an den verschiedenen Stellen bestimmt. Man trennt den Faden bei umgekehrtem Instrument ab, indem ein gelinder Schlag gegen das Ende geführt wird. Das Quecksilber zerreißt im Gefäß oder in der Kapillare an derjenigen Stelle, wo ein winziges Luftbläschen an der Wand haftet, was erklärt, daß die Flüssigkeit nach ihrer Vereinigung wieder genau an derselben Stelle abreißt. Man läßt das Bläschen in die Kapillare wandern, womöglich ohne zu erwärmen, und kühlt ab Wenn der Faden nun an der Stelle der Blase vorbeigeht, wird das Instrument im geeigneten Augenblick umgekehrt und geklopft. Der Faden reißt dann in der gewünschten Länge ab

Es sei das Intervall 0—100 zu kalibrieren. Der Anfang des Fadens, dessen Länge l so gewählt wird, daß $100/l = n$ eine ganze Zahl ist, wird nacheinander nahezu auf die Teilstriche 0, l, 2l ... durch Neigen des Rohrs gebracht. Er nehme dabei die Strecken $l + \delta_1$, $l + \delta_2$, ... $l + \delta_n$ ein. Setzt man $\Sigma = \frac{1}{n}(\delta_1 + \delta_2 + \ldots + \delta_n)$, so ergibt sich die folgende Tabelle.

Teilstrich	Korrektion	
0	0	$= \Delta_0$
l	$\Sigma - \delta_1$	$= \Delta_1$
2l	$2\Sigma - \delta_1 - \delta_2$	$= \Delta_2$
:	.	
ml	$m\Sigma - \delta_1 - \delta_2 \cdots - \delta_m$	$= \Delta_m$
:	:	
100	0	$= \Delta_{100}$

Allgemein ist $\Delta_m = \Delta_{m-1} + \Sigma - \delta_m$ die Korrektion für den Teilstrich ml, die algebraisch zu der Ablesung zu addieren ist.

Genauer verfährt man, wenn die Kalibrierung mit Fäden von verschiedener Länge ausgeführt wird. So wählt man z. B. für das Intervall 0—100 Fadenlängen von 20, 40, 60 und 80 und bestimmt folgende Lagen:

Fadenlänge	Lage
20	0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100
40	0—40, 20—60, 40—80, 60—100
60	0—60, 20—80, 40—100

Für die Beobachtungen wird ein Rechenschema gebildet, wie für d
Bestimmung von Teilungsfehlern von Maßstäben (S. 15)[12].

Um den Einfluß von Temperaturänderung auszuschließen, werden d
Fäden im Hin- und Rückgang beobachtet, oder das Rohr wird mit eine
Wassermantel umgeben.

Der Gradwert eines Thermometers wird durch die Beobachtung v
Eis- und Siedepunkt oder durch Vergleichung zweier Punkte mit eine
Normalthermometer ermittelt. Entsprechen den beiden Temperaturen
und t_2 die Skalenstellen $t_1 + \varepsilon_1$ und $t_2 + \varepsilon_2$, so ist der Gradwert γ:

$$\gamma = 1 + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1} = 1 + \Delta\gamma.$$

Die Gradwertkorrektion $\Delta\gamma$ geht in alle Messungen ein und ist besonde
bei Thermometern zu beachten, die mit veränderlicher Quecksilbermeng
benutzt werden. Ist hier ein Faden von der Länge l abgetrennt, so h
sich dadurch der Gradwert im Verhältnis von 1 : (1 + 0,00016 l) ve
kleinert.

5. Widerstandsthermometer.

Gegenüber den Quecksilberthermometern, von denen jedes einzeln
schon wegen seines unbekannten Kalibers ein besonders zu untersuche
des Individuum darstellt, zeigt das Widerstandsthermometer über ei
weites Temperaturgebiet einen einfachen gesetzmäßigen Verlauf, de
durch die Messungen an wenigen Punkten bestimmt werden kann. De
Nachteil, den die Unbequemlichkeit der Ablesung mit sich bringt, komm
für das Laboratorium nicht in Betracht, wenn es sich um die Gewinnun
genauer und sicherer Normalthermometer handelt.

Man verwendet für den Widerstand wegen seiner Beständigkei
meistens nackten Draht aus reinem Platin, der bei etwa 1200° elektrisc
ausgeglüht und dann bifilar und lose auf ein Kreuz aus Glimmer ode
besser Hartbrandporzellan aufgewickelt wird, dessen Ränder mit Zähne
versehen sind, welche die Windungen auseinander halten (Fig. 67). An
beide Enden des Platindrahts setzen sich dickere doppelte Zuleitunge
aus Silber (für tiefe Temperaturen genügt auch Kupfer), die kurz vo
dem Austritt aus dem Schutzrohr aus Glas oder Porzellan in Kupfer-
drähte auslaufen, welche zu den kupfernen Klemmen führen. Sie sind
an dem Deckel aus Hartgummi befestigt, der das Schutzrohr in solche
Höhe abschließt, daß er nicht unter der Strahlung des Ofens leidet. Die
Länge und den Durchmesser (0,05 bis 0,2 mm) des Platindrahts wählt
man je nach der zu messenden Temperatur und dem Verfahren der

[12]) J. Pernet, W. Jaeger u. E. Gumlich, Wissensch. Abhandl. P.-T. Reichs-
anstalt 1, 80, 196.

Widerstandsmessung, damit die Änderung, welche der Widerstand der Zuleitungen durch die Temperatur erfährt, nicht in die Messung eingeht. Hiernach kann der Widerstand klein sein, wenn er mit übergreifendem Nebenschluß oder durch Spannungsmessung mit dem Kompensationsapparat gemessen wird.

Für besondere Zwecke läßt sich der Widerstandsdraht natürlich auch anders anordnen, die angegebene Art ist für Normalthermometer besonders geeignet, wo es darauf ankommt, daß der angelassene Draht nicht verändert wird. Thermometer z. B., deren Draht auf Quarzglasdorne aufgewickelt und danach eingeschmolzen wird, erleiden namentlich in tiefer Temperatur Spannungen, die den Widerstand schwankend machen. Auch wird der Platindraht durch das Quarzglas beim Einschmelzen angegriffen, wie aus der Abnahme des Temperaturkoeffizienten hervorgeht.

Fig. 97 Widerstandsthermometer.

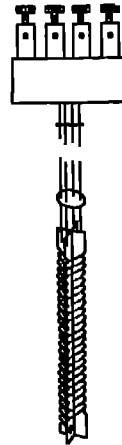
Der Widerstand R des Platinthermometers ändert sich zwischen — 40° und 1000° nach einer quadratischen Gleichung, deren drei Konstanten durch die Messung bei 0°, 100° und den Siedepunkt des Schwefels bestimmt werden (CALLENDAR 1887). Bezeichnet man die Temperatur in der Platinskala mit t_p, also

$$t_p = \frac{100\,(R - R_0)}{R_{100} - R_0} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{R}{R_0} - 1\right),$$

so besteht zwischen t_p und der Zählung t in der Celsiusskala die Beziehung

$$t - t_p = \delta\left[\left(\frac{t}{100}\right)^2 - \frac{t}{100}\right],$$

wo sich die Konstante δ für reines Platin nur wenig von 1,50 unterscheidet. Ein sicheres Kennzeichen für die Reinheit des Metalls bildet der Koeffizient α, der nicht viel von 0,003 91 abweichen soll. Man berechnet t_p und entnimmt das zugehörige t am besten aus einer Tabelle[13]).

Unterhalb — 40° gilt die quadratische Gleichung zwischen Widerstand und Temperatur nicht mehr. Für den Bereich von 0° bis — 193° gilt eine Interpolationsformel höheren Grades (S. 102), deren Koeffizienten durch die Widerstandsmessung am Eispunkt, am Schmelzpunkt des Quecksilbers und an den Siedepunkten der Kohlensäure und des Sauerstoffs zu bestimmen sind. Das Platinthermometer ist noch bei den Temperaturen des flüssigen Wasserstoffs brauchbar, aber unter 200° ist das Gesetz für die Widerstandsabnahme ziemlich verwickelt, so daß aus diesem

[13]) L. HOLBORN, K. SCHEEL u. F. HENNING, Wärmetabellen der P.-T. Reichs-

Grunde das Goldthermometer[14]) oft vorgezogen wird. Bei der Temperatur des flüssigen Heliums ist der Widerstand des Goldes und des Platins konstant. Man nimmt an, daß dieser Restwiderstand von Verunreinigungen der Metalle herrührt, und benutzt zur Temperaturmessung die Widerstandsänderung des Manganins und des Konstantans[15]), die bekanntlich bei gewöhnlicher Temperatur sehr gering ist.

Die folgende Tabelle enthält das Widerstandsverhältnis R_t/R_0, wie es sich für ein Platinthermometer der P.-T. Reichsanstalt darstellt[16]). Die einzelnen Instrumente zeigen nur geringe Abweichungen voneinander, wenn reines Platin benutzt wird. Über das häufig benutzte Bleithermometer, das nicht so konstant wie der Platinwiderstand ist, siehe die Wärmetabellen der P.-T. Reichsanstalt.

Widerstandsverhältnis R/R_0 reinen Platins

0°	1,000 00	– 100°	0,596 01	– 200°	0,172 20
– 10	0,960 19	– 110	0,554 77	– 210	0,130 21
– 20	0,920 31	– 120	0,513 33	– 220	0,090 80
– 30	0,880 29	– 130	0,471 64	– 230	0,056 00
– 40	0,840 15	– 140	0,429 69	– 240	0,028 030
– 50	0,799 84	– 150	0,387 40	– 250	0,010 216
– 60	0,759 41	– 160	0,344 83	– 260	0,004 001
– 70	0,718 81	– 170	0,302 00		
– 80	0,678 05	– 180	0,259 00		
– 90	0,673 13	– 190	0,215 78		

6. Thermoelement.

Eine zweite elektrische Eigenschaft, welche viel zur Temperaturmessung benutzt wird, ist die Thermoelektrizität, wobei die Auswahl der Metalle für das Thermoelement je nach dem zu messenden Temperaturgebiet verschieden getroffen wird. Das Element wird meistens in die Form gebracht, daß man die beiden Drähte an den einen Enden verlötet und diese Lötstelle auf die zu messende Temperatur bringt, während man die andern Enden, die je mit einem Kupferdraht verlötet werden, auf konstanter Temperatur, z. B. auf 0°, hält.

Für höhere Temperatur, von etwa 300° aufwärts, hat sich am besten das Platin-Platinrhodium- (90 Pt, 10 Rh) Element (Le Chatelier) bewährt. Es ist bis zum Schmelzpunkt des Platins brauchbar, kann freilich nicht lange Zeit wegen des schnellen Verschleißes bis zu dieser Grenze benutzt werden, hat aber bis 1600° verwendet eine ziemliche Dauer.

---

[14]) P. G. Cath, H. Kamerlingh Onnes u. J. M. Burgers, Comm. Leiden Nr. 152c. 1917.

[15]) H. Kamerlingh Onnes u. G. Holst, ebd. Nr. 142a. 1914.

Die einzelnen Drähte werden durch dünne Röhrchen aus Marquardtscher Masse — solche aus gewöhnlichem Hartbrandporzellan halten nur bis 1200° vor — voneinander isoliert, und das Ganze befindet sich in einem weiten glasierten Rohr aus demselben Stoff, der die Drähte namentlich gegen Flammengase schützen soll, welche die Platinmetalle angreifen und ihre Thermokraft ändern. Eine solche Änderung tritt auch in mehr oder weniger starkem Grade auf bei Elementen, die länger bei sehr hoher Temperatur benutzt werden. Die Ursache bildet die Zerstäubung der Drähte; namentlich ist der Platindraht sehr empfindlich, wenn er zerstäubtem Rhodium ausgesetzt ist, was aus der Natur des Vorgangs, bei dem sich gewissermaßen Nebenlötstellen bilden, leicht zu erklären ist. Solche verdorbene Elemente erkennt man leicht daran, daß sie, mit dem Galvanometer verbunden und erhitzt, Thermoströme erkennen lassen, trotzdem die Hauptlötstelle kühl gehalten wird.

Das Element Platin-Platiniridium, das ebenfalls benutzt wird und das ebenso wie jenes eine Empfindlichkeit von etwa 10 Mikrovolt/Grad aufweist ist der Gefahr der Verunreinigung mehr ausgesetzt, weil Iridium stärker zerstäubt als Rhodium.

Für niedrige Temperaturen dient das Element Konstantan-Eisen (50 μV/Grad) oder Konstantan-Kupfer (40 μV/Grad). Beide Elemente, deren Thermokraft fast linear mit der Temperatur zunimmt, können auch höher hinauf bis 900° bzw. 600° benutzt werden, wenn man das Kupfer durch Silber ersetzt. Sie dienen auch zu Beobachtungen unterhalb 0°, wo die Elemente aus Platinmetallen unempfindlich sind. Andere Elemente aus unedlen Metallen, z. B. Nickel-Nickelchrom, reichen sogar bis 1100°[17]). Diese Drähte sind natürlich ebenso wie die Platinmetalle vor dem Gebrauch auf Homogenität zu prüfen. Für die Temperaturen des flüssigen Wasserstoffs erweist sich das Gold-Silberelement geeignet, doch in der Nähe des absoluten Nullpunktes scheint die Thermokraft aller Elemente zu verschwinden[18]).

Beobachtet wird entweder in der Kompensationsschaltung, wobei die Widerstandsänderung des Elements ohne Einfluß ist, oder mit einem empfindlichen Zeigergalvanometer von hohem Widerstande, das meistens neben der Voltskale eine solche für die Temperatur trägt. Vorher ist das Element an ein bekanntes anzuschließen, indem die heißen Lötstellen beider vereinigt werden, oder das unbekannte Element ist durch Schmelzpunkte zu eichen, worauf wir später zurückkommen.

---

[17]) F. Hoffmann u. A. Schulze, ETZ 1920, 427.

7. Dampfdruckthermometer.

Starke Veränderungen mit der Temperatur zeigt der Sättigungsdruck der Flüssigkeiten, der deshalb auch zur Temperaturmessung verwendet wird. Für höhere Temperaturen wird er namentlich für technische Thermometer gebraucht, wo der Druck durch lange, mit Flüssigkeit gefüllte Kapillaren auf ein Federmanometer wirkt. Im Laboratorium findet das Verfahren besonders zur Messung tiefer Temperaturen Verwendung. Das kleine Glasgefäß A, in dem die Flüssigkeit der tiefen Temperatur ausgesetzt wird, ist durch eine Glasfeder mit dem Meßrohr M verbunden, das neben einem Barometerrohr B aufgestellt wird. Es kommen Drucke unterhalb einer Atmosphäre zur Verwendung, so daß nur der Höhenunterschied der Quecksilberkuppen im Dampf- und im Barometerrohr mit dem Kathetometer zu messen ist. Da der Dampfdruck durch die tiefste Temperatur des Dampfrohres bestimmt wird, kann das Gefäß beliebig aus dem Temperaturbade herausragen. Die folgende Tabelle enthält nach den Beobachtungen von HENNING und STOCK[19]) den Sättigungsdruck für eine Reihe von Flüssigkeiten, die eine stetige Reihe bis — 180° abwärts bilden. Daran schließen sich noch die Zahlen für Sauerstoff, Wasserstoff und Helium.

Fig. 68. Dampfdruckthermometer.

Gleichsam eine Umkehrung des Verfahrens, die Temperatur aus dem Sättigungsdruck zu bestimmen, bildet das Hypsometer, bei dem aus der Siedetemperatur des Wassers auf den Sättigungsdruck geschlossen wird. Die Flüssigkeit siedet in einem kleinen Kessel an der offenen Atmosphäre, so daß der Sättigungsdruck gleich dem Luftdruck ist; die Siedetemperatur wird mit einem kleinen Thermometer gemessen. Mit dem Apparat kann daher der Reisende ebenso wie mit dem Barometer die Höhe von Bergen ermitteln. Einem Unterschiede von 0,037° in der Siedetemperatur entspricht 1 mm im Stande des Barometers und ein Höhenunterschied von 11 m an der Erdoberfläche.

Vergleicht man an einem Orte gleichzeitig das Siedethermometer und das Barometer, so läßt sich nach MOHN (1899) die Schwerekorrektion des Barometers und somit auch die Schwerkraft selbst bestimmen. Dieses Verfahren hat HECKER[20]) zu Messungen auf dem Ozean benutzt,

[19]) F. HENNING u. A. STOCK, ZS. f. Phys. 4, 226. 1921.

[20]) O. HECKER, Bestimmung der Schwerkraft auf dem Schwarzen Meere.

Sättigungsdrucke (mm Quecksilber) zur Messung tiefer Temperaturen.

t	CH_4	CO_2	PH_3	HCl	t	O_2[21]	t	H_2[22]
− 180°	110				− 205°	33	− 252°	929
− 175	212				− 204	40	− 253	697
− 170	353				− 203	48	− 254	500
− 165	559				− 202	57,5	− 255	351
					− 201	68	− 256	247
	C_2H_4				− 200	81	− 257	161
− 140	46				− 199	95	− 258	100
− 135	74				− 198	111	− 259	58
− 130	117		30		− 197	130		
− 125	178		61		− 196	151		
− 120	260		93		− 195	174		He[23]
− 115	372		137		− 194	201	− 268	1550
− 110	519	35	196	145	− 193	230	− 269	680
− 105	705	61	275	210	− 192	263	− 270	100
− 100		105	377	299	− 191	300	− 271	23
− 95		174	505	417	− 190	341		
− 90		279	664	599	− 189	385,5		
− 85		430	NH_3	761	− 188	435		
− 80		673	38		− 187	490		
− 75		979	56		− 186	548		
− 70			82		− 185	613		
− 65			118	SO_2	− 184	683,5		
− 60			165	43	− 183	760		
− 55			227	62				
− 50			307	87				
− 45			410	120				
− 40			539	162				
− 35			700	217				
− 30		CS_2	897	286				
− 25		35		371				
− 20		46,5		477				
− 15		61		605				
− 10		79		760				
− 5		101						
0		127						

weil auf dem Schiff keine Pendelbestimmungen möglich sind. Es stellt an die Genauigkeit der Thermometer große Anforderungen. Mit drei

[21]) P. G. Cath, Comm. Leiden Nr. 152d. 1918. — F. Henning u. W. Heuse, ZS. f. Phys. 23, 113. 1924.

[22]) J. Palacios Martinez u. H. Kamerlingh Onnes, Comm. Leiden Nr. 156b. 1922.

[23]) H. Kamerlingh Onnes, ebd. Nr 119. 1911. Bis auf 1° ist man mit diesen

Siedethermometern aus Glas 59 III wurde im Mittel eine Übereinstin mung von 0,02 mm Quecksilbersäule erreicht Ist p_t der Luftdrucl der aus der Dampftabelle für die beobachtete Siedetemperatur zu en nehmen ist, p_b der Stand des Barometers, reduziert auf 0° und norma Schwere (aus der bekannten Breite berechnet), so erhält man für d Schwerekorrektion $\Delta g = p_t - p_b$ mm Hg $= \frac{980}{760}(p_t - p_b)$ cm/sec^{-2}.

8. **Strahlungsthermometrie**[24]).

Oberhalb des Goldschmelzpunkts wird die Temperaturskale nicl mehr durch das Gasthermometer, sondern durch Strahlungsmessung verwirklicht. Die hierfür in Betracht kommenden Gesetze beziehen si ebenfalls auf die thermodynamische Skale und betreffen einerseits d Gesamtstrahlung, andererseits die homogene Strahlung von bestimmt Wellenlänge, und zwar handelt es sich in beiden Fällen um die Strahlu des schwarzen Körpers, dessen Absorptionsvermögen gleich eins ist, d also nach dem KIRCHHOFFschen Gesetz das größte Emissionsvermög besitzt. Einer schwarzen Strahlung, wie man kurz die Strahlung d schwarzen Körpers bezeichnet, läßt sich eine Temperatur zuordne bei der sie der schwarze Körper aussendet diese Temperatur heißt ebe falls die schwarze Temperatur. Nur für den schwarzen Körper fä diese mit der wahren zusammen, für alle übrigen Körper ist sie höchste gleich, im allgemeinen aber kleiner als die wahre. Schwächer als d schwarze Körper strahlen z. B. die blanken Metalle, sie haben demer sprechend ein kleines Absorptions-, aber ein großes Reflexionsvermög Schlechte Strahler sind auch die durchsichtigen Körper, die ebenfa ein geringes Absorptionsvermögen aufweisen. Bezeichnet man es mit ferner das Reflexionsvermögen mit $\mathfrak{R}$ und die Durchlässigkeit mit so ist $\mathfrak{A} = (1 - \mathfrak{R}) - \frac{\mathfrak{D}}{1 - \mathfrak{R}}$.

Vielfach wird noch der Begriff der Farbtemperatur eines Strahl verwandt: darunter versteht man diejenige Temperatur, bei welcher d schwarze Körper dieselbe Energieverteilung im sichtbaren Gebiet besi wie der Strahler.

Für die schwarze Gesamtstrahlung S gilt das STEFAN-BOLTZMANNsc Gesetz, wonach 1 cm² einer schwarzen Fläche bei der absoluten Tem ratur T aussendet: $S = \varsigma T^4$, wo $\varsigma = 1{,}37 \cdot 10^{-12}$ cal · cm^{-2} · sec^{-1} · Gra $= 5{,}7 \cdot 10^{-12}$ Watt · cm^{-2} · Grad^{-4}.

Die Energie E_λ der schwarzen Teilstrahlung von der Wellenläng wird durch das PLANCKsche Gesetz bestimmt: $E_\lambda = C\,\frac{\lambda^{-5}}{e^{c/\lambda T} - 1}$,

$C = v^2 h = 5{,}87 \cdot 10^{-6}$ Erg $\mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{sec}^{-1}$ und $c = vh/k = 1{,}43\,\mathrm{cm} \cdot$ Grad. Hiernach strahlt in einer Sekunde senkrecht von der schwarzen Fläche F in den räumlichen Winkel $d\omega$ die Energie $E_\lambda \cdot d\lambda \cdot dF \cdot d\omega$ zwischen den Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$.

Für $\lambda T < 4000$, d. h. im sichtbaren Gebiet für $T < 3000°$, kann man ohne merkliche Fehler die WIENsche Gleichung an die Stelle setzen:
$E_\lambda = C\lambda^{-5} e^{-c/\lambda T}$ oder $\ln E_\lambda = C_1 - \frac{c}{\lambda}\frac{1}{T}$ oder $\log E_\lambda = C_2 - \frac{c \log e}{\lambda}\frac{1}{T}$.
Danach hängt $\log E_\lambda$ linear von $1/T$ ab: die logarithmischen Isochromaten bilden gerade Linien.

Wir sehen hier ab von den verschiedenen Verfahren, die zur Bestimmung der Konstanten der Strahlungsgesetze dienen und beschränken uns auf die Messungen, welche die Fortsetzung der Temperaturskale über den Goldschmelzpunkt hinaus bezwecken. Hierfür ist besonders

Fig. 69. Schwarzer Körper.

das WIENsche Gesetz und damit die Messung der sichtbaren Strahlung von Bedeutung, die den Gegenstand der optischen Pyrometrie bildet, welche zunächst behandelt werden soll. Auf die Gesamtstrahlung gehen wir später nur ein, soweit sie zur Temperaturmessung dient.

Die schwarze Strahlung wird in den hohen Temperaturen, welche für die optische Pyrometrie in Betracht kommen, als Hohlraumstrahlung durch den elektrisch geheizten schwarzen Körper erzeugt[25]). Er besteht aus einem zylindrischen Rohr aus schwer schmelzbarem Porzellan oder aus Magnesia, das, durch eine konzentrische Hülle gegen Wärmeverlust geschützt, einen Heizwiderstand aus Platinblech trägt, welcher entweder aus schmalem Band gewickelt oder in einem Stück als geschlossene, eng anliegende Haut geformt ist. In der Mitte, in dem gleichmäßig geheizten Teil, befindet sich die strahlende Kammer, die durch eine hintere Querwand und ein vorderes Diaphragma begrenzt ist (Fig. 69). Diese können entweder mit dem Heizrohr ein Stück bilden, oder sie werden in dieses als Böden besonderer kleiner Trommeln eingeschoben, was den Vorteil hat, daß man die günstigst geheizte Stelle aussuchen kann. Die vordere Austrittsöffnung für die Strahlung ist verengt, und weiter zurückliegende Blenden schirmen die Wirkung der Zylinderwandung ab. Man kann das Innere des Heizrohrs noch durch Eisen- oder Chromoxyd schwärzen, was freilich für die sichtbare Strahlung nicht so wichtig

ist wie für die Messung langer Wellen. Die Temperatur der Kammer wi durch ein Thermoelement aus Platin-Platinrhodium gemessen, dess Lötstelle nebst einer kleinen Locke von einigen Windungen vor c strahlenden Querwand liegt, durch welche die Schenkel nach hint isoliert hinausgeführt werden.

Durch Heizung auf den Goldschmelzpunkt wird die Ausgangstempe tur der radiometrischen Skala hergestellt Bei fundamentalen Messung kontrolliert man das Thermoelement noch durch ein zweites; seine L stelle, in welche ein kurzer Golddraht eingeschmolzen ist, wird von vo an die strahlende Querwand herangebracht. Man verfolgt das Schmelz unter Beobachtung beider Elemente. In dem Unterschied ihrer Angal prägt sich auffällig aus, daß das Schmelzelement hinter dem ande durch die Wirkung der Schmelzwärme zurückbleibt· der Anfang die Nachhinkens entspricht der wahren Schmelztemperatur.

In ähnlicher Weise läßt sich die schwarze Strahlung höherer Schme punkte, z. B. des Palladiums und des Platins, herstellen, wobei für letztere ein Heizwiderstand aus Iridium und ein Thermoelement Iridium-Iridiumrhuten benutzt werden kann.

Statt den strahlenden Hohlraum mit einem Heizwiderstand zu erwärm kann man ihn auch mit der geschlossenen Rückwand in ein heizba Metallbad tauchen, das sich namentlich im Zustand des Schmelz oder Erstarrens im elektrischen Ofen beliebig lange auf konstanter Te peratur halten läßt (Fig. 70)[28]).

Die Energie der sichtbaren Strahlung wird durch die Helligkeit messen, was mit jedem Spektralphotometer geschehen kann, durch die zu messende Helligkeit mit derjenigen einer Vergleichslampe in ei bestimmten Farbe verglichen wird. Die Genauigkeit, mit welcher s die Temperatur aus der Helligkeit H_λ bestimmen läßt, nimmt wachsender Temperatur ab nach der Gleichung $\frac{dH_\lambda}{H_\lambda} = \frac{c}{\lambda T} \frac{dT}{T}$

Als Beispiel sei das Polarisationsphotometer (Fig. 71) angefü und zwar dasjenige von KÖNIG-MARTENS, welches mit einigen Änderun unmittelbar als optisches Pyrometer Verwendung gefunden hat Hir dem Doppelspalt, dessen eine Hälfte von der Vergleichslampe und des andere von der zu messenden Strahlung beleuchtet wird, werden Strahlen durch eine Linse parallel gerichtet, dann durch ein Flintg prisma zerlegt und abgelenkt und durch eine zweite Linse zu einem B an der Stelle des Okularspaltes vereinigt. Zwischen Prisma und zwe Linse sind noch ein WOLLASTONsches Prisma (zusammengesetzt

zwei miteinander verkitteten Kalkspatprismen) und ein Zwillingsprisma eingeschaltet. Hier werden durch Doppelbrechung beide Strahlenbündel in je zwei senkrecht zueinander polarisierte Bündel zerlegt, von denen aber nur zwei, zu verschiedenen Quellen gehörige, zum Okularspalt gelangen, so daß das Auge des Beobachters zwei Felder in senkrecht zueinander polarisiertem Licht sieht, deren Helligkeit in meßbarer Weise durch einen drehbaren Nicol geändert werden kann. Die Drehung wird an einem Teilkreis abgelesen, dessen Nullpunkt mit der Auslöschung des einen Feldes zusammenfällt.

Hat die schwarze Strahlung, welche die eine Hälfte des Objektivspalts erleuchtet, während auf die andere das Licht der Vergleichslampe fällt, bei zwei Temperaturen T_1 und T_2 die Helligkeiten H_1 und H_2 einer bestimmten Wellenlänge, die mit der Schraube ein-

Fig. 70. Schwarzer Körper.

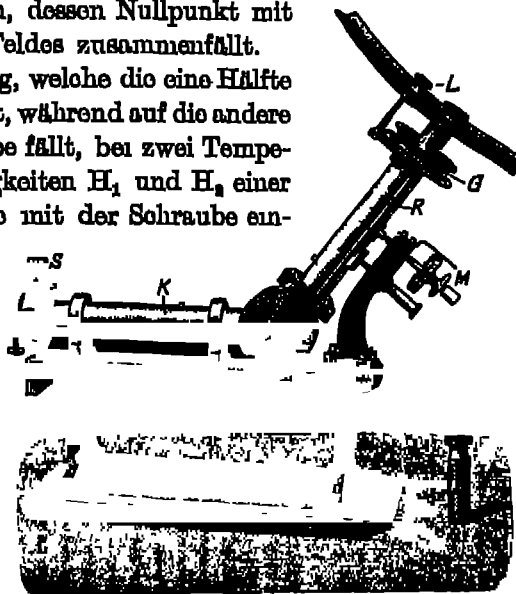



Fig. 71. Polarisationsphotometer.

zustellen ist, und bedarf es zur Abgleichung der Felder der Nicoleinstellung φ_1 und φ_2, so ist $H_1 : H_2 = \mathrm{tg}^2 \varphi_1 : \mathrm{tg}^2 \varphi_2$.

Die Empfindlichkeit der Einstellung ist am größten für 45° und nimmt von da nach beiden Seiten ab. Man macht sich von dieser Veränderlichkeit frei, wenn man immer in dieser Gegend einstellt, zu welchem Zwecke die zu messende Strahlung gegebenenfalls zu schwächen ist. Hierzu dient entweder der rotierende Sektor, der den Vorteil gewährt, daß er alle Wellenlängen in demselben Verhältnis schwächt, oder ein Rauchglas, das mehr oder weniger selektiv wirkt. Deshalb ist seine Durchlässigkeit vor dem Gebrauch über das ganze Spektrum zu prüfen. Eine geringe Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigt die Durchlässigkeit des Jenaer Rauchglases Nr. 12 554, von dem vier Dicken von etwa 1 mm genügen, die stärksten Helligkeiten irdischer Quellen auf ein für das Auge erträg-

Schwächt man bei der Beobachtung mit dem Polarisationsphotomete die Helligkeit H_2 auf $1/n$, so ergibt sich $H_2 = n \frac{tg^2 \varphi_2}{tg^2 \varphi_1} H_1$, und für di den Helligkeiten entsprechenden Temperaturen folgt

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda}{c \log e} \log \frac{H_2}{H_1}.$$

Für die radiometrische Skala sind die Schmelzpunkte des Palladiun und des Platins als Fixpunkte wichtig. Ihre Temperatur wurde gemesse indem man das Verhältnis einer schwarzen Teilstrahlung zwischen diese Punkten und dem Goldschmelzpunkt photometrisch bestimmte Auf die Weise ergab sich

λ	$\frac{H_{Pd}}{H_{Au}}$	$\frac{H_{Pt}}{H_{Au}}$	T_{Pd}	T_{Pt}
0,65 μ	81,5	284	1830°	2044°

wenn für T_{Au} der Wert 1336° zugrunde gelegt wird[27]).

Für pyrometrische Zwecke hat WANNER[28]) das Photometer nac KÖNIG-MARTENS etwas verändert · als Prisma wurde ein gradsichtig gewählt, so daß alles in einem einfachen Rohr Platz findet Der Okula spalt wird auf eine bestimmte Wellenlänge eingestellt, gewöhnlich d der roten Wasserstofflinie (0,6563 μ). Ferner wird dem Instrument ei Amylazetatlampe beigegeben, mit der man die Vergleichslampe kontro lieren kann. Ihre Helligkeit stellt man zweckmäßig so ein, daß sie d schwarzen Strahlung von 1473° entspricht, so daß bei dieser Temperatur d Nicolstellung 45° beträgt. Alsdann ist $\log tg^2 \varphi = \frac{c \log e}{\lambda}\left(\frac{1}{1473} - \frac{1}{T}\right)$ Damit kann die ungeschwächte schwarze Strahlung zwischen T = 110(und 1900° beobachtet werden. Tiefere Temperaturen sind zu dunk höhere, bei denen die Einstellung unempfindlich wird, schwächt man dur ein Rauchglas, das sich vor den Spalt stecken läßt, und berechnet a dem Schwächungsverhältnis nach dem WIENschen Gesetz eine zwei Einstellungstabelle.

Das Pyrometer von HOLBORN und KURLBAUM (1901)[29]) beruht a einer besonderen photometrischen Grundlage · man beobachtet die Stro stärke, bei welcher der Faden eines Glühlämpchens, der in den Gang d zu messenden Strahlung gebracht wird, auf dem leuchtenden Hint grunde dem Auge entschwindet. Zu diesem Zweck entwirft eine O jektivlinse ein reelles Bild der Strahlungsquelle am Orte des Glühlampe

[27]) F. HOFFMANN u. W. MEISSNER, a. a. O. — F. HOFFMANN, ZS. f. Phys. 2 285. 1924.

[28]) F. WANNER, Phys. ZS. 1901, 112.

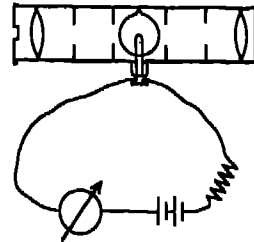
fadens, und beides wird durch ein Okular mit vorgestecktem farbigen Glas betrachtet. Ist die Lampe stromlos, so hebt sich ihr Faden schwarz auf hellem Hintergrunde ab, während er zu stark mit Strom belastet heller leuchtet. Dazwischen stellt man mit Hilfe eines Vorschaltwiderstandes diejenige Stromstärke ein, bei der das mittlere Stück des Fadens gerade verschwindet. Sie wird an einem empfindlichen Stromzeiger abgelesen (Fig. 72).

Benutzt werden 4-Volt-Lämpchen mit einem zu einem Bügel gebogenen Faden aus Kohle oder Wolfram, die vor dem Gebrauch längere Zeit bei normaler Strombelastung gebrannt werden. Durch diese Alterung wird späteren Änderungen der Helligkeit vorgebeugt, wenn diese nicht über 1800° gesteigert wird. Die Abhängigkeit des Lampenstromes von der Temperatur wird durch Vergleichung mit dem elektrisch geheizten schwarzen Körper an mehreren Punkten ermittelt und danach eine Interpolationsformel aufgestellt, die in logarithmischen Koordinaten einfach ausfällt.

Fig. 72. Optisches Pyrometer.

Als farbiges Glas vor dem Okular benutzt man meistens ein rotes, weil sich mit einem solchen einerseits der engste Spektralbereich ausschneiden, andererseits bis zu den tiefsten Glühtemperaturen Messungen anstellen lassen, wo für $T < 1100°$ das farbige Glas ohne Schaden weggelassen werden kann, da bei Beginn des Glühzustandes nur rote Strahlung vorhanden ist. Man vermag dann bis zu $T = 900°$ abwärts zu messen.

Wenn in vollkommen homogenem Licht beobachtet werden soll, so wendet man spektrale Zerlegung durch ein Prisma an, auf das ein Spalt abgebildet wird, welcher von dem Glühlampenfaden und dem Bild der Strahlungsquelle erleuchtet wird. Ein besonderes Fernrohr mit Okularspalt läßt sich dann auf eine beliebige Wellenlänge einstellen, in deren Farbe der Lampenfaden und der zu messende Strahler dem Beobachter erscheinen[80]).

Wendet man starke Vergrößerung an, um auch kleine Gegenstände messen zu können, wozu sich besonders die Wolframlampen mit ihren feinen Fäden eignen, so macht es sich unangenehm bemerkbar, daß der Strahlengang durch die Glashülle der Glühlampe abgelenkt wird. Diese Störung läßt sich beseitigen, wenn ein Linsensatz des Pyrometers drehbar angeordnet ist oder wenn Lampen mit angeschmolzenen ebenen Glasflächen verwendet werden.

Da der Berechnung der Temperatur aus dem Helligkeitsverhältnis eine bestimmte Wellenlänge zugrunde gelegt werden muß, so fragt es sich, welcher Wert hierfür bei einem farbigen Glase anzunehmen ist, das niemals vollkommen homogenes Licht, sondern selbst in dem günstigsten Falle des roten Glases einen größeren Wellenlängenbereich durchläßt.

Beobachtet man mit dem optischen Pyrometer die schwarze Strahlung bei den beiden Temperaturen T_1 und T_2, so ist nach dem WIENschen Gesetz $\frac{E_{T_1\lambda}}{E_{T_2\lambda}} = e^{\frac{c}{\lambda}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$. Die Helligkeiten H_1 und H_2 bei den Temperaturen T_1 und T_2 sind: $H_1 = \int_0^\infty E(\lambda, T_1) \cdot \varphi(\lambda) \cdot \varrho(\lambda) \cdot d\lambda$ und $H_2 = \int_0^\infty E(\lambda, T_2) \cdot \varphi(\lambda) \cdot \varrho(\lambda) \cdot d\lambda$, wo $\varphi(\lambda)$ die Funktion für die Augenempfindlichkeit und $\varrho(\lambda)$ die der Durchlässigkeit des farbigen Glases bedeutet. Beide Funktionen wird man in Abhängigkeit von λ darstellen und die Integrale graphisch auswerten. Wählt man nun λ so, daß $E_{T_1\lambda}/E_{T_2\lambda} = H_1/H_2$, so ist dieser Wert, der mit λ_w bezeichnet sein möge, die mittlere wirksame Wellenlänge für das Temperaturintervall $T_2 - T_1$, und es ist: $\lambda_w = \frac{c\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}{\ln H_1 - \ln H_2}$, im Grenzfall, wo T_2 mit T_1 zusammenfällt, geht der Ausdruck über in

$$\lambda_w = \frac{\int_0^\infty E(\lambda, T) \cdot \varphi(\lambda) \cdot \varrho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \frac{1}{\lambda} \cdot E(\lambda, T) \cdot \varphi_{\bar{\lambda}} \cdot \varrho(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\int_0^\infty H(\lambda, T)\, d\lambda}{\int_0^\infty \frac{1}{\lambda} \cdot H(\lambda, T)\, d\lambda}. \text{ [31]}$$

Nun ist λ_w mit der Temperatur etwas veränderlich. Wenn also eine schwarze Strahlung von der Temperatur T_2 auf T_1 durch den rotierenden Sektor geschwächt wird, so bildet der Ausdruck $\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda \log \varrho'(\lambda)}{c \log e}$ keine Konstante, wie es bei der monochromatischen Strahlung der Fall ist. Noch weniger trifft dies zu, wenn ein selektives Rauchglas als Schwächungsmittel dazu kommt. Der gewöhnliche schwarze Körper, der mit einer Spule aus Platin geheizt wird, bietet einen zu engen Temperaturbereich, als daß der Grad der Änderung beobachtet werden könnte. Nachdem die Durchlässigkeiten der Gläser mit dem Spektralphotometer bestimmt worden sind, rechnet man deshalb nach der vorstehenden Formel

Die folgende Tabelle enthält nach HOFFMANN[32]) in der zweiten Spalte die wirksame Wellenlänge für das benutzte rote Jenaer Glas F 4512 bei einer Dicke von 2,16 mm; die dritte und vierte Spalte beziehen sich darauf, daß das Rauchglas I (0,46 mm dick) oder II (2 mm dick) vor das Objektiv gesteckt wird, von denen das zweite eine Durchlässigkeit von etwa 0,11%, das erste eine solche von 1% und eine starke Selektion in Rot aufweist. Die beiden letzten Spalten enthalten die Temperaturen T^1, die der durch das Rauchglas I oder II geschwächten Strahlung der Temperatur T entsprechen.

Wirksame Wellenlänge λ_w des Glühlampenpyrometers.

T	F 4512	F 4512 + I	F 4512 + II	T^1	
	μ	μ	μ	I	II
1073°	0,6530	0,6607	0,6644	882°	967°
1373	0,6517	0,6600	0,6630	1073	1205
1673	0,6509	0,6570	0,6622	1246	1430
1973	0,6504	0,6571	0,6610	1404	1643
2273	0,6500	0,6566	0,6612	1540	1840
3273	0,6493	0,6556	0,6604	1953	2455
4273	0,6489	0,6551	0,6600	2209	2978

Einfacher läßt sich die wirksame Wellenlänge mit einem Instrument beobachten, welches sich ohne Verstellung der Glühlampe sowohl als Spektral- wie als Farbglaspyrometer brauchen läßt. Man betrachtet mit dem Farbglas einen hell leuchtenden Strahler und stellt auf Verschwinden des Glühfadens ein. Darauf wird im Spektrum die Wellenlänge aufgesucht, bei welcher dieselbe Einstellung der Stromstärke erhalten bleibt[33]).

Zur Eichung der Pyrometerlampe kann man statt eines schwarzen Körpers auch eine Glühlampe benutzen, die statt eines Fadens ein einige Millimeter breites Wolframband besitzt[34]). Die normale Leuchtstärke wird dann in bekanntem Verhältnis durch Sektor oder Rauchglas geschwächt und bei den verschiedenen, relativ bekannten Helligkeiten die Stromstärke der Pyrometerlampe bestimmt. Es ist dann nur noch notwendig, eine absolute Temperatur zu messen. Mit Instrumenten, die eine starke Vergrößerung aufweisen, beobachtet man zu diesem Zweck die Schmelztemperatur eines freistrahlenden Platindrahts von 0,3 mm Dicke, der in Form eines Bügels zwischen zwei Klemmen gespannt und durch einen gelochten Glaszylinder gegen Luftströmungen

[32]) F. HOFFMANN, ZS. f. Phys. 17, 1. 1923.
[33]) F. HENNING, ZS. f. Instr. 1925, 530.

geschützt ist. Man verstärkt den Heizstrom, bis der Draht in lebhafte Weißglut geraten ist; seine Temperatur steigt alsdann ohne weitere Stromverstärkung infolge der Zerstäubung langsam bis zum Schmelzpunkt an, so daß man bequem mit der Einstellung der Pyrometerlampe folgen kann. Die optische Schmelztemperatur T verschiedener freistrahlender Platinmetalle haben HENNING und HEUSE in dieser Weise mit dem Spektral- und dem Farbglaspyrometer gemessen; für die Wellenlänge von 0,622 μ ergab sich.

Palladium	1672°	Rhodium	1903°
Platin	1844°	Iridium	2341°

Die beiden letzten Metalle, die sich nicht ziehen lassen, wurden in Form dünner schmaler Blechstreifen geschmolzen.

Die schwarze Schmelztemperatur S dieser Metalle, die man im schwarzen Körper beobachten würde, liegt natürlich viel höher und ist schon für Palladium und Platin angegeben (S. 122). Man kann sie aus der Temperatur T berechnen, wenn das Emissionsvermögen $\mathfrak{E}$, also das Helligkeitsverhältnis zwischen dem Metall und dem gleichtemperierten schwarzen Körper, bekannt ist. Denn es ist: $\ln \mathfrak{E}_\lambda = -\frac{c}{\lambda}\left(\frac{1}{S_\lambda} - \frac{1}{T_\lambda}\right)$. Umgekehrt läßt sich, wenn zusammengehörige Werte von S und T mit dem optischen Pyrometer bestimmt worden sind, $\mathfrak{E}$ für alle Temperaturen finden. Dazu formt man aus dem Metallblech einen Hohlraum und mißt das Helligkeitsverhältnis zwischen seiner freien blanken Oberfläche und seinem Innern. Alle Anordnungen, die man für solche Bestimmungen getroffen hat, lassen jedoch darin zu wünschen übrig, daß die Messung der Oberflächentemperatur mehr oder weniger unsicher ist. Allein der Schmelzpunkt der Edelmetalle bildet eine Ausnahme, wenn seine Temperatur anderweitig, z. B. thermoelektrisch, vorher gemessen wurde. So haben HOLBORN und HENNING (1905) die Helligkeit von schmelzendem Gold und Silber mit dem optischen Pyrometer beobachtet und für das Emissionsvermögen dieser Metalle Werte gefunden, die mit den bei Zimmertemperatur beobachteten übereinstimmten. Soweit die Genauigkeit der bisherigen Versuche reicht, trifft dieses Ergebnis auch für andere Metalle zu: ihr Emissionsvermögen ist innerhalb der Fehlergrenzen unabhängig von der Temperatur. Da $\mathfrak{E}_\lambda = 1 - \mathfrak{R}_\lambda$, so ergibt sich bei Zimmertemperatur das Emissionsvermögen aus dem Reflexionsvermögen, indem man mit dem optischen Pyrometer die schwarzen Temperaturen einer Teilstrahlung und ihres vom ebenen Metallspiegel reflektierten Bildes ermittelt.

Wir wollen auf die Versuche, den Schmelzpunkt des Wolframs zu be-

fahren angewendet worden sind, um das freistrahlende Metall zu „schwärzen" und mit dem optischen Pyrometer die wahre Schmelztemperatur zu finden. So bestimmte LANGMUIR[35]) einerseits aus den optisch gemessenen Temperaturen der Außen- und Innenseite des schraubenförmig angeordneten Leuchtkörpers einer Wolframlampe das Emissionsvermögen des Metalls, von dem er dann an einer Lampe mit geradem Draht die Schmelztemperatur ermittelte, andererseits diente ihm für denselben Zweck eine Lampe, wo der zwischen zwei Wolframelektroden übergehende Bogen deren Oberfläche zum Schmelzen brachte; er fand für die absolute Schmelztemperatur 3570°. PIRANI und ALTERTHUM[36]) maßen die Helligkeit einer engen Bohrung, die in einem elektrisch geheizten Wolframstäbchen quer zu seiner Längsrichtung angebracht war, kurz vor dem Zusammenschmelzen und leiteten daraus unter der Annahme, daß die beobachtete Strahlung schwarz wäre, eine Schmelztemperatur von 3600° ± 40° ab; der Schmelzpunkt des Molybdäns wurde nach demselben Verfahren zu 2840° ± 40° bestimmt.

HENNING und HEUSE[37]) brachten die Kugel einer Wolframbogenlampe der Osramgesellschaft zum Schmelzen. Sie sahen schräg mit dem optischen Pyrometer in eine 2 mm tiefe Grube der Kugel und erhielten 3040° für die Schmelztemperatur. Die zu messende Helligkeit wurde auf etwa $1 \cdot 10^{-4}$ geschwächt, indem ein Bild des Strahlers mit einer Linse auf einen mit Magnesia überzogenen Schirm geworfen wurde, dessen diffuses Reflexionsvermögen die Beobachter vorher für das verwandte rote Licht zu 0,97 gefunden hatten. Vor dem Schmelzen wurden zwischen 2300 und 3500° zusammengehörige Temperaturen der Oberfläche und des Innern der Kugel gemessen, woraus sich das Emissionsvermögen zu 0,40 ergab. Da sich an der Lampenglocke während des Versuchs das zerstäubte Wolfram niederschlägt, so ist nachher deren Durchlässigkeit zu messen· der Lichtverlust betrug bei dem Schmelzen 20—30%.

ZWIKKER[38]) hat die schwarze und die Oberflächentemperatur von Wolframstäben verglichen, die in dem Vakuum eines Glaskolbens zum Glühen gebracht wurden, entweder durch Joulesche Wärme oder durch Elektronenbombardement. Mit dem Glühlampenpyrometer wurde die Oberfläche und eine in dem Stabe angebrachte Bohrung anvisiert. Die folgende Tabelle enthält die zusammengehörigen Werte von T und S sowie die daraus abgeleiteten Werte des Emissionsvermögens $\mathfrak{E}_\lambda$ ($\lambda = 0{,}665\ \mu$), die einen Gang mit der Temperatur zeigen.

---

[35]) J. LANGMUIR, Phys. Rev. (6, 138. 1915 u.) 7, 311. 1916.
[36]) M. PIRANI u. W. ALTERTHUM, ZS. f. Elch. 1923, 5.
[37]) F. HENNING u. W. HEUSE, ZS. f. Phys. 16, 63. 1923.

T	S	$\mathfrak{E}_\lambda$
1200°	1150°	0,46
1500	1420	0,45
2000	1800	0,44
2500	2275	0,43
3000	2675	$0,41_5$
3400	2980	0,41

Zuletzt sind noch die Versuche zu erwähnen, die Temperatur der Bogenlampe zu messen. Da die Helligkeit des positiven Kraters der in Luft brennenden Kohle von der Stromdichte nicht abzuhängen scheint, liegt die Annahme nahe, daß es sich dabei um eine Zustandsänderung handelt, die als Fixpunkt dienen kann. Wie PATZELT[39]) fand, setzt Unreinheit der Kohle die Temperatur herab; für reine ergab sich bei einer Stromdichte von 0,746 Ampere/mm² der Wert T = 3775°. Nach KOHN und GUCKEL[40]) hat die Beschaffenheit der Atmosphäre, mag der Bogen in freier Luft, Kohlensäure, Stickstoff oder Argon brennen, keinen Einfluß; LUMMER[41]) nimmt 4200° als Kratertemperatur an. HENNING und HEUSE[42]) fanden als Mittel den niedrigeren Wert 3700° für rotes und grünes Licht; ihre Einzelmessungen an verschiedenen Stellen des Kraters weisen eine Streuung bis 50° auf. Die Lichtschwächung betrug etwa $1 \cdot 10^{-5}$

ALTERTHUM, FEHSE und PIRANI[43]) haben 37 mm starke Graphitstäbe, die an den Enden stark verdickt waren, elektrisch in einer Wasserstoffatmosphäre durchgeschmolzen und dabei die schwarze Temperatur in einer freien Bohrung gemessen. Für den Schmelzpunkt ergab sich T = 3760° ± 65°. RYSCHKEWITSCH und F. MERCK[44]) finden 3845° ± 45°.

Die Gesamtstrahlung hat für die Temperaturmessung keine so große Bedeutung wie das Licht, hat jedoch mehrfach zu der Konstruktion von technischen Meßgeräten angeregt, weil diese den empfindlicheren optischen Pyrometern gegenüber den Vorteil besitzen, daß ihre Angaben registrierbar sind und keines Beobachters bedürfen. Die Strahlen, die von dem zu messenden Körper ausgehen, werden durch Spiegel oder Glaslinsen auf die Lötstelle eines dünnen Thermoelements geworfen, die ein geschwärztes Blättchen von 2—3 mm Durchmesser trägt; die feinen Drähte sind kreuzförmig angeordnet und führen zu Nebenlötstellen, die gegen die Strahlung geschützt sind. Da diese mit der vierten

39) F. PATZELT, ZS. f. techn. Phys. 1923, 66.
40) H. KOHN u. M. GUCKEL, ZS. f. Phys. 27, 305. 1924.
41) O. LUMMER, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik. 1917.
42) F. HENNING u. W. HEUSE, ebd. 32, 820. 1925.
43) H. ALTERTHUM, W. FEHSE u. M. PIRANI, ZS. f. Elch. 1925, 313.

Potenz der absoluten Temperatur steigt, so sind die Instrumente unterhalb 300° zu unempfindlich, und die Skale ist ungleichmäßig. Wichtig ist die passende Anordnung der Blende, deren Öffnung von der Strahlung stets ausgefüllt sein muß, damit die Angaben von der Entfernung unabhängig sind. Man benutzt deshalb für die Einstellung gewöhnlich ein kleines Fernrohr, das hinter der Lötstelle angebracht ist. Fig. 73 zeigt als Beispiel schematisch das Ardometer von Siemens & Halske[45]), dessen Thermoelement zur Erhöhung der Empfindlichkeit in eine dünne evakuierte Glashülle eingeschlossen ist. Die Hauptlötstelle wird bis auf etwa 250° erwärmt, so daß in der Nähe großer Öfen die Temperatur der Nebenlötstellen zu beachten ist. Sie sind mit Zeigergalvanometern von derselben Art verbunden, wie sie zur Beobachtung der Thermoelemente dienen. Die Instrumente, die nach schwarzen Temperaturen geeicht werden, zeigen, wie alle ihrer Gattung, bei der Messung nichtschwarzer Strahler größere Abweichungen von der wahren Temperatur als die optischen Pyrometer

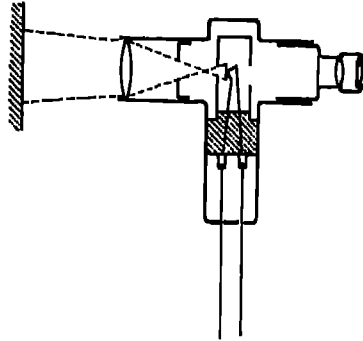



Fig. 73. Ardometer.

9. Thermometrische Hilfsmittel.

Für die Thermometrie ist die Erzeugung von Temperaturen, die zeitlich konstant und in bestimmter räumlicher Ausdehnung gleichmäßig sind, von Wichtigkeit. Die Verfahren dazu setzen eine Reihe von Geräten voraus, die am besten im Zusammenhang mit den Messungen beschrieben werden. Besonderer Nachdruck wird dabei auf die Herstellung der Fixpunkte gelegt werden, welche für die Temperaturskale die Grundlage bilden. Hierfür kommen zunächst die Schmelzpunkte in Frage, deren Konstanz auf der latenten Wärme beruht, die ein fester Stoff aufnimmt, wenn er bei seiner Erwärmung in den flüssigen übergeht. Ein mit dem Stoff verbundenes Thermometer behält dabei seinen Stand so lange bei, bis er vollständig geschmolzen ist. Der umgekehrte Vorgang, daß ein flüssiger Körper durch Abkühlung fest wird, bildet ebenfalls in dem Temperaturverlauf eine Unstetigkeit, die sich infolge von Unterkühlung wohl verzögern kann, dann aber mit ebenso großer Schärfe eintritt wie die Schmelztemperatur.

Den Ausgangspunkt der Temperaturskale bildet wegen seiner großen Genauigkeit der Schmelzpunkt des Eises bei normalem Atmosphären-

druck, den man unter dem Einfluß der gewöhnlichen Zimmertempera
vorzunehmen pflegt. Zu diesem Zwecke benutzt man am besten
Glasgefäß, das mit fein geschabtem und mit destilliertem Wasser geträ
tem Eis gefüllt wird. Überflüssiges Schmelzwasser läßt man durch ei
am Gefäßboden befindlichen Hahn abfließen und füllt frisches
so weit nach, daß man stets eine breiige Masse behält. Zuviel Was
liefert den Eispunkt zu hoch, zu wenig entweder ebenso, wenn s
zwischen Thermometer und Eis Luftzwischenräume bilden, die
Wärmeaustausch hemmen, oder zu niedrig, wenn das Eis unterkü
war. Reinheit des Eises ist natürlich Bedingung; 0,3°/₀₀ Kochsalz
niedrigen den Schmelzpunkt um 0,01°, weshalb anzuraten ist, sich du
eine Probe mit Silbernitratlösung von der Abwesenheit des Sal
namentlich bei der Verwendung von künstlichem Eis, zu überzeug
Mit reinem Natureis erhält man die Temperatur auf etwa 0,003° gen

Der Einfluß des Drucks ist gering: nimmt er um 1 Atm. ab, so st
der Schmelzpunkt um 0,0075°. Ferner ist die Temperatur des Eis-Wa
gemisches noch abhängig von der gelösten Luftmenge, die auch v
Druck abhängt, jedoch überhaupt nur einen geringen Einfluß hat
beträgt nur 0,0024°/Atm. Faßt man beides zusammen, so ist die Än
rung mit dem Druck gegeben durch $\Delta t = 0{,}000\,13\,(76 - p)$, wo p
Druck in cm Quecksilber bedeutet[48])

Ebenso wie den Schmelzpunkt benutzt man den Siedepunkt verse
dener Stoffe als eine Vergleichstemperatur. Das Thermometer wird h
bei nicht in die siedende Flüssigkeit, sondern in deren Dampf angebra
dessen Temperatur leichter und schärfer zu beobachten ist, weil sie
zeitlich und räumlich gleichmäßiger ausbildet. Da der Siedepunkt stä
als der Schmelzpunkt von dem Druck abhängt, so gehört zu jeder Si
temperatur eine Druckmessung, die mit dem Barometer ausgeführt w
wenn das Sieden an der offenen Atmosphäre vor sich geht. Des V
gleichs wegen werden die Siedebeobachtungen auf den Druck e
normalen Atmosphäre zurückgeführt, was die Umrechnung der Qu
silberhöhe auf 0° und normale Schwere verlangt. Die Korrektion
steigt im allgemeinen mit der absoluten Siedetemperatur T, da nach
Gleichung von CLAPEYRON-CLAUSIUS: $\Delta T = T \frac{V_D - V_Fl}{r} \Delta p$, wo
und V_{Fl} die spezifischen Volumina von Flüssigkeit und Dampf u
die Verdampfungswärme bedeutet.

Den zweiten Fundamentalpunkt der Temperaturskale stellt die Si
temperatur des Wassers bei normalem Druck dar. Zur Beobacht
dient die von RUDBERG (1837) angegebene Röhre mit Mantel, der

inneren Dampfraum, in dem sich die Thermometer befinden, gegen Abkühlung schützen soll. Auf der anderen Seite kann auch die Überhitzung des Dampfes eine Fehlerquelle bilden, weshalb man bei den Apparaten, wo der Wasserkessel W mit dem Dampfmantel D und dem Rückflußkühler R (Fig. 74) aus einem Stück besteht, mit der Erwärmung durch große Flammen vorsichtig sein muß. Entsprechend der mehr oder weniger starken Dampfentwicklung herrscht im Dampfraum ein Überdruck über die Atmosphäre, der mit einem Wassermanometer M dort zu messen ist, wo die Temperatur bestimmt werden soll. Einer Druckänderung von 1 mm Quecksilber oder 13,6 mm Wasser entspricht eine Siedepunktskorrektion von 0,037°, so daß der Siedepunkt an demselben Orte mit dem Wechsel des Barometerstandes um etwa 2° schwanken kann. Man entnimmt die Siedetemperatur der folgenden Tabelle, in die man mit dem beobachteten Druck eingeht, der sich aus dem Barometerstande und dem in Quecksilber umgerechneten Überdruck des Wassermanometers zusammensetzt.

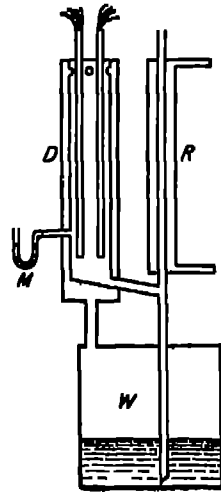



Fig. 74.
Siedeapparat.

Siedepunkt des Wassers bei dem Barometerstande p.

p mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
680	96,916°	,956	,996	*,037	*,077	*,117	*,157	*,197	*,237	*,277
690	97,317	,357	,397	,437	,477	,516	,556	,596	,635	,675
700	97,714	,754	,793	,832	,872	,911	,950	,989	*,028	*,067
710	98,106	,145	,184	,223	,262	,301	,339	,378	,417	,455
720	98,494	,532	,571	,609	,648	,686	,724	,762	,801	,839
730	98,877	,915	,953	,991	*,029	*,067	*,105	*,142	*,180	*,218
740	99,255	,293	,331	,368	,406	,443	,481	,518	,555	,593
750	99,630	,667	,704	,741	,778	,815	,852	,889	,926	,963
760	100,000	,037	,073	,110	,147	,184	,220	,257	,293	,330
770	100,366	,402	,439	,475	,511	,547	,584	,620	,656	,692
780	100,728	,764	,800	,836	,872	,908	,944	,980	*,016	*,051
790	101,087	,122	,158	,194	,229	,265	,300	,335	,371	,406

Ist die Abhängigkeit des Sättigungsdrucks von der Temperatur bekannt, so könnte man mit einer Flüssigkeit in weitem Bereiche Temperaturen leicht und genau herstellen. Hinderlich ist jedoch hierbei die starke Zunahme des Sättigungsdrucks mit der Temperatur, die bald zu

herrschen ließen. Man hat es deshalb vorgezogen, die Siedeflüssig zu wechseln, um neue Temperaturen zu gewinnen. So läßt sich z. B. Azeton 57°, mit Äthylalkohol 78°, Toluol 109°, Amylazetat 1 Methylbenzoat 212°, Amylbenzoat 257° durch Sieden bei normalem D herstellen, wobei der Dampf in einen Rückflußkühler kondensiert in das Siedegefäß zurückgeleitet wird. Doch haben solche Einrichtu nur für besondere Fälle Verwendung gefunden, da sich mit elekt geheizten Flüssigkeitsbädern leichter eine Reihe konstanter Temp turen beherrschen läßt.

Eine Siedetemperatur ist jedoch für die Thermometrie von gr Bedeutung, nämlich die des Schwefels, weil sie hauptsächlich zur Eic der Platinwiderstandsthermometer dient[47]). Die fachste und ausreichende Anordnung für diesen Z bildet die VIKTOR MEYERsche Röhre: ein Glasrohr 50 cm Länge und 4 bis 5 cm Weite, das an dem schlossenen Ende etwa 8 bis 10 cm hoch mit Sch gefüllt ist, der durch einen Bunsenbrenner geschm und zum Sieden gebracht wird. Die Seitenwan durch ein Metallblech vor den aufsteigenden brennungsgasen und durch Asbestumhüllung g Wärmeabgabe geschützt. Das zu vergleichende T mometer ragt in die aufsteigenden Schwefeldän die bei der Länge des Rohrs vor dessen Mün kondensieren, und ist vor Ausstrahlung durch e konischen Schirm aus Asbest oder Eisenblech bew in dessen Inneres der Dampf durch Löcher eintritt. der Unterbrechung des Versuchs ist die Röhr neigen, weil sonst der erstarrte Schwefel bei der Wiedererwärmun leicht zersprengt (Fig. 75).

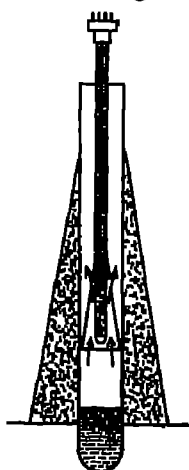



Fig. 75. Schwefelsieden.

Dieselbe Anordnung dient zur Beobachtung der Siedetemperature Naphthalin und Benzophenon, für welche die Formeln S. 108 angeg wurden.

Für die Messung des Schwefelsiedepunkts sind mehrfach auch A rate aus Metall konstruiert, in denen der Schwefel durch elektrische Gasheizung zum Sieden gebracht wird. Sie sind da von Nutzen wegen der Größe oder der Zahl der Thermometer die einfache Glas nicht ausreicht.

[47]) L. HOLBORN u. F. HENNING, Ann. Phys. 26, 844. 1908. — A. D R. SOSMAN, Ann. Phys 38, 849. 1912. — P. CHAPPUIS, Trav. et Mém. du B

Die Abhängigkeit der Siedetemperatur des Schwefels vom Druck kann aus der folgenden Tabelle entnommen werden.

Siedepunkt des Schwefels bei dem Barometerstande p.

p mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
680	43 6,985°	7,083	7,182	7,280	7,378	7,476	7,573	7,671	7,760	7,866
690	43 7,964	8,001	8,158	8,255	8,352	8,440	8,546	8,043	8,740	8,836
700	43 8,933	9,029	9,125	9,222	9,318	9,414	9,510	9,606	9,701	9,797
710	43 9,893	9,988	*0,083	*0,179	*0,274	*0,369	*0,464	*0,559	*0,653	*0,748
720	44 0,843	0,937	1,032	1,126	1,220	1,314	1,408	1,502	1,596	1,690
730	44 1,784	1,877	1,971	2,064	2,157	2,251	2,344	2,437	2,530	2,622
740	44 2,715	2,808	2,900	2,993	3,085	3,177	3,270	3,362	3,454	3,546
750	44 3,637	3,729	3,821	3,912	4,004	4,095	4,186	4,277	4,368	4,459
760	44 4,550	4,641	4,731	4,822	4,912	5,003	5,093	5,183	5,273	5,363
770	44 5,453	5,543	5,633	5,722	5,812	5,901	5,991	6,080	6,169	6,258
780	44 6,347	6,436	6,525	6,614	6,702	6,791	6,879	6,967	7,056	7,144
790	44 7,232	7,320	7,407	7,495	7,583	7,670	7,758	7,845	7,933	8,020

Zwischen 0° und 100° ist das Wasserbad, nötigenfalls elektrisch geheizt, wegen der großen spezifischen Wärme des Wassers das sicherste und bequemste Mittel. Erforderlich ist die Anwendung eines wirksamen Rührers, den man gleichzeitig als elektrischen Heizkörper ausbilden kann. Man setzt z. B. die Heizwicklung in einen abgeschlossenen Metallkörper, den man der besseren Wärmeübertragung wegen mit Öl füllt. Oberhalb 100° verwendet man Öl oder Speisefett, z. B. Palmin, als Badflüssigkeiten, in die natürlich unmittelbar die nackte Heizwicklung eingesetzt werden kann. Bei höherer Temperatur wird ein Absaugen der lästigen Dämpfe nicht zu umgehen sein. Man bedient sich deshalb oberhalb 220° bis etwa 600° des Salpeterbades, das mit einer Mischung von Kali- und Natronsalpeter (101: 85) gefüllt ist. Im Laufe der Zeit zersetzt sich freilich das Salzgemisch, namentlich bei höherer Temperatur; es wird alkalischer und greift Glasthermometer dann stark an, so daß man diese mit Schutzröhren umgeben und das Salz nach häufigerem Gebrauch auswechseln muß. Die Heizspule, zu der man zweckmäßig Chromnickel verwendet, bringt man entweder in autogen geschweißten Eisengefäßen in das Innere, oder man wickelt — was einfacher, wenn auch nicht so wirksam ist — die Heizspule unter Zwischenlage einer Asbestpappe außen auf den eisernen Badbehälter. Mit der Zeit zieht sich der flüssige Salpeter über den Deckel und kann zu Kurzschlüssen in der außen angebrachten Heizspule führen, wovor man sie durch einen mit dem oberen Gefäßrand verschweißten Eisenblechmantel schützt. Vielfach ordnet man sowohl

welche die Flüssigkeit, durch eine Turbine T bewegt, hintereinan
durchströmt. Fig. 76 stellt ein solches Salpeterbad mit äußerer H
spule dar; das innere Rohr Z ist unten gekröpft, damit die Mitte ni
durch die Stange A des Rührers versperrt wird und ein Luftthermome
gefäß G aufnehmen kann. Ein solches Bad kann durch einen Bren
angeheizt werden, so daß der elektrische Strom nur zum Halten
Temperatur benutzt wird.

Für höhere Temperaturen verwendet man elektrisch geheizte L
bäder, deren Wicklung aus Nickel- oder Chromnickeldraht auf Röh

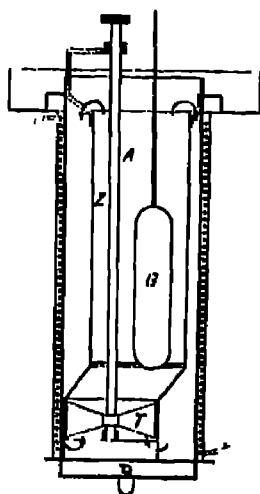
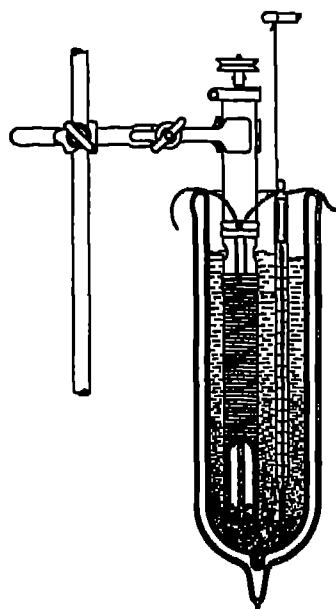



Fig. 76. Salpeterbad. Fig. 77. Vakuummantelgefäß.

aus Porzellan, Magnesia usw. nackt aufgebracht und durch Ausschmier
mit derselben ungebrannten, mit Wasser angesetzten Masse isoliert w
Solche Anordnungen bewähren sich bis 1000°, höchstens 1100°, für n
höhere Temperaturen muß die Heizspule aus Platin angefertigt werd
das je nach der verfügbaren Spannung entweder als Draht oder als dü
Folie in Form einer zusammenhängenden Haut den Heizraum umgi
Soll die Temperatur auf lange Strecken gleichmäßig sein, so ist
Heizung der Enden zu verstärken und dort entweder der Wi
stand zu erhöhen oder die Zahl der Windungen, gegebenenfalls du
eine zweite konzentrische Spule, zu vermehren.

Elektrische Heizkörper aus Kohle, z B dem reinen Acheson-Grap
sind überall da von Nachteil, wo man Thermoelemente oder sonst

Platinmetalle im Ofen unterbringt, da diese nicht allein durch die Kohle selbst, sondern auch durch die daraus entweichenden Kohlenwasserstoffe verdorben werden. So wird diese Heizung meistens nur in den höchsten Temperaturen, wo optische oder sonstige Strahlungspyrometer zur Beobachtung dienen, benutzt. Um die Kohle vor schnellem Abbrand zu schützen, schließt man den Ofen ab und hält ihn durch dauerndes Pumpen unter Vakuum. Neuerdings findet auch das Wolfram als Draht oder Blech in einer Stickstoff-Wasserstoff-Atmosphäre für die Heizspule Verwendung.

Für Arbeiten bei hohen Drucken wird der elektrische Ofen in eine feste Stahlbombe gesetzt, deren Wände durch Metallschirme und Kühlschlangen vor Erwärmung geschützt werden[48]).

Vorrichtungen anderer Art verlangt die Thermometrie für die Untersuchungen unterhalb 0°. Als wirksamstes Schutzmittel gegen Wärmeleitung und Strahlung dient hier allgemein das Vakuummantelgefäß. Wenn dieses auch mit Vorteil in höherer Temperatur Verwendung finden kann, wie Fig 77 zeigt, wo der Inhalt durch eine elektrische Wicklung erwärmt wird, welche auf dem Porzellanrohr des Turbinenrührers sitzt, so ist es für die Messung tiefer Temperaturen unentbehrlich. Zum Schutze gegen Strahlung sind die Gefäße innerhalb ihres Mantels entweder versilbert oder verkupfert, wobei nach Bedarf Streifen für die Durchsicht freibleiben. Gefäße aus Porzellan, die man während des Krieges einzuführen versuchte, haben sich nicht dauernd behauptet. Dagegen werden jetzt brauchbare Flaschen aus dünnem, schlecht leitendem Metallblech hergestellt, die namentlich für die Aufbewahrung flüssiger Luft usw. den Glasflaschen nicht nachstehen. Das Vakuum des Mantels wird dadurch vielfach verbessert, daß er entgaste Holzkohle enthält, die, bei jeder Füllung abgekühlt, die Gasreste aufnimmt (Dewar). Solche Kohle muß frei von Eisen sein, da dieses Element bei dem Zusammentreffen von Kohle und sauerstoffreicher flüssiger Luft, das bei einem zufälligen Bruch der Gefäßwandung eintreten kann, Explosionen einleitet.

Konstante Temperaturen liefern zunächst die Gemische verschiedener Salze mit Eis, und zwar geben 100 Teile Eis mit

10	Teilen	Kaliumsulfat	−1,0°
13	„	Kaliumnitrat	−2,0
30	„	Kaliumchlorid	−10,6
25	„	Ammoniumchlorid	−15,0
33	„	Natriumchlorid	−21,2
200	„	Calciumchlorid	−35.

[48]) Th. Des Coudres, Ber. Ges. Wissensch. Leipzig 62, 296, 1910. J. Johnston

Ferner gibt Kohlensäureschnee, den man durch Entspannen der kä lichen Bomben in einen wollenen Beutel auffängt, etwa —78,5°. I Kältemittel wird mit Alkohol gemischt, so daß ein Brei entsteht, (nach Bedarf, wenn er zu flüssig wird, durch Nachfüllen von fes Kohlensäure eingedickt wird.

Mit der technischen Verwendung der flüssigen Luft zur Gastrennu ist ihr Gebrauch in den physikalischen Laboratorien allgemeiner ; worden, die das Kältemittel nun teils kaufen, teils es mit eigr kleinen Anlagen herstellen können. Das LINDE-HAMPSONsche Prin der Luftverflüssigung beruht auf dem JOULE-THOMSONschen Effe die Luft wird auf 150 bis 200 Atm. komprimiert, von Feuchtigkeit u Kohlensäure befreit und darauf durch ein Ventil entspannt. Dadu abgekühlt fließt sie in einem konzentrischen Rohr der nachströmenc Luft entgegen, die dadurch vorgekühlt wird, und gelangt von neu zum Kompressor. Auf diese Weise schreitet die Temperaturernie(gung des Apparats weiter fort, bis teilweise Verflüssigung eintr Die bei dem Entspannen eintretende Temperaturänderung ΔT w für die Druckdifferenz Δp durch die folgende Gleichung dargeste in der c_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck bezeichn $\Delta T = \frac{1}{c_p}\left\{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right\}\Delta p$. Für Laboratoriumsapparate, die schı ein Quantum flüssiger Luft liefern sollen, werden vielfach die HAMPS(schen Verflüssiger angewandt, die LINDEsche Anordnung mehr längere Betriebsdauer

Der von CLAUDE (1905) angegebene Verflüssiger beruht auf der] pansion mit der Leistung äußerer Arbeit, ein Verfahren, dem CAILLE (1878) seine Erfolge verdankte. Damals gelang es aber nicht, mit ein Motor die Verflüssigungstemperatur zu erreichen, weil ein passendes zur Schmierung des Arbeitszylinders fehlte. CLAUDE verwendet hie Pentan oder Hexan oder die erzeugte flüssige Luft. Die Abkühlung komprimierten Luft ergibt sich aus der Beziehung: $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1-}$, wo $\varkappa$ das Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Drı und konstantem Volumen bezeichnet. Theoretisch ist dieses Verfah dem andern überlegen, aber praktisch besteht kein Unterschied im V kungsgrad.

Mit flüssiger Luft lassen sich Flüssigkeiten in Vakuummantelgefä leicht abkühlen und auf tiefer Temperatur konstant halten. Am tiefs kommt man mit Petroläther, der allerdings an der Luft unter dem E fluß der Feuchtigkeit früher zähe wird als in den Thermometern.

verdampft, die von einer Vorratsflasche V_2 durch einen Vakuumheber H zugeführt wird (Fig. 78). Sie ist durch einen Gummistopfen verschlossen, der außer von dem Heber H noch von einem kurzen Glasrohr R_1 durchsetzt wird. Dieses ist durch einen Gummischlauch mit einem zweiten Rohr R_2 verbunden, das in ein mit Wasser gefülltes Gefäß G taucht, und zwar verschieden tief je nach Druck, den man in der Vorratsflasche V_2 erzeugen will, wo ein Teil der flüssigen Luft durch die aus der Umgebung eindringende Wärme verdampft und durch das Rohr R_2 ins Wasser entweicht. Auf diese Weise läßt sich der Strom der in den Thermostaten gedrängten flüssigen Luft und damit dessen Temperatur konstant halten[49]).

In derselben Weise lassen sich Körper aus Kupfer oder Aluminium, die wegen der Zunahme der Wärmeleitung mit fallender Temperatur als gute Wärmeverteiler wirken, in

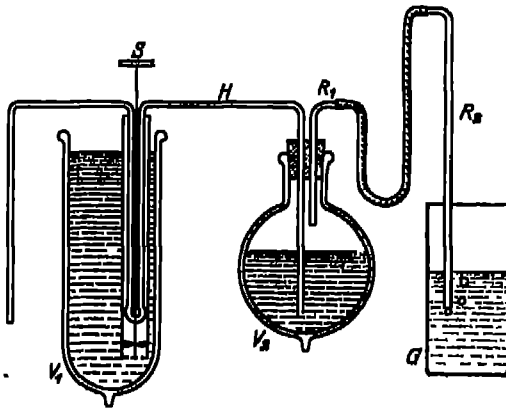



Fig. 78. Thermostat für tiefe Temperatur.

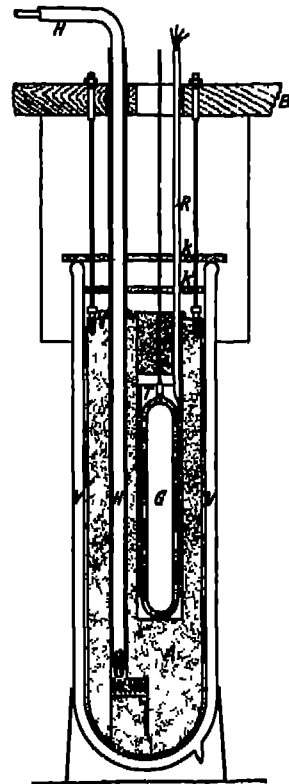



Fig. 79. Thermostat für tiefe Temperatur.

einem Vakuummantelgefäß abkühlen und auf einer gewünschten Temperatur beliebig lange halten. Solche Anordnungen sind auch noch unterhalb 200° durch Abkühlung mit flüssigem Wasserstoff verwendbar. Die Regelbarkeit wird erhöht durch eine elektrische Heizspule auf dem Umfang des Körpers, mit der nach Bedarf schnell erwärmt werden kann. Fig. 79 zeigt im Gefäß V den Körper, in dessen Inneres der Vakuumheber H die flüssige Luft leitet, während sich das Luftthermometergefäß G, umgeben vom Platinthermometer TR, daneben befindet.

Nach oben ist das Vakuummantelgefäß durch den doppelten Har
gummideckel k k′ gegen die Aufhängung B abgeschlossen

Bevor man nach dem LINDE-HAMPSONschen Verfahren (1895) groß
Mengen flüssiger Luft herstellen konnte, wurde die Kaskadenmetho
zur Erzeugung tiefer Temperaturen benutzt. In dem Kältelaboratoriu
zu Leiden[80]) wird hiernach gearbeitet, namentlich auch wenn Bäder ko
stanter Temperatur unterhalb 0° gebraucht werden. Der Ausgang d
dortigen Kaskade bildet das Methylchlorid, das bei Zimmertemperat
einen Sättigungsdruck von etwa 4 Atm. besitzt. In einem Neusilbe
gefäß läßt man diese Flüssigkeit unter einem Druck von 1 bis 1,5 c
Quecksilber sieden, indem der Dampf durch eine Vakuumpumpe eine
Kompressor zugeleitet wird, in welchem wieder die Verdichtung z
Flüssigkeit stattfindet, die in das Siedegefäß zurückkehrt. Hierin erreic
man eine Temperatur von — 85° bis — 90°. Die zweite Stufe der Kaska
bildet das Äthylen, das im gasförmigen Zustande aufbewahrt wird u
in einer Kondensationsschlange, die im siedenden Methylchlorid an
bracht ist, bei etwa 5 Atm. verflüssigt wird. Darauf tritt die Flüssigk
in ein Gefäß, wo sie bei einem Druck von etwa 2 cm Quecksilber bei ei
Temperatur von — 150° siedet. Besondere Pumpen und Kompresso
bewirken den Kreislauf des Äthylens in ähnlicher Weise wie die Maschi
der ersten Stufe den des Methylchlorids In der dritten Stufe wird Sau
stoff verflüssigt, der mit 20 Atm. eingeleitet beim Sieden an der Atr
sphäre eine Temperatur von —183° liefert, die durch Abpum
auf —217° herabgesetzt werden kann.

Innerhalb des ganzen Bereichs läßt sich durch die Einstellung
Pumpen für jede Zwischentemperatur ein Bad erzeugen, wobei die K
kade noch zur Verflüssigung von Luft, Stickoxydul und Methan
braucht wird, wovon die beiden letzten Siedetemperaturen zwisc
—90° und —102° bzw. zwischen —161° und —183° liefern.

Die tiefste Temperatur, welche die Kaskade liefert, reicht nicht
Wasserstoff zu verflüssigen. Dazu wird das LINDE-HAMPSONsche V
fahren angewandt, nachdem das auf 150 bis 200 Atm. komprimierte
durch flüssige Luft abgekühlt ist, weil erst unterhalb —80° der Jo
THOMSONsche Effekt eine Abkühlung bewirkt (DEWAR 1898). Gı
Reinheit des Wasserstoffs ist erforderlich, da sich sonst durch Gefri
der Beimengungen die Leitungen verstopfen. Auf die Möglichkeit,
Mischungen von Luft und Wasserstoff durch Explosion große Störu
verursachen können, braucht nicht besonders hingewiesen zu wer
Doch ist darauf aufmerksam zu machen, daß auch reiner Wa
stoff beim raschen Ausströmen aus Leitungen an der Luft in Branc

raten kann, indem ein Funken von den elektrisch sich aufladenden Rohren ihn entzündet. Mit siedendem Wasserstoff lassen sich Bäder zwischen —253° und —259° herstellen.

In dem Zwischenraum zwischen —217° und —253° gibt es noch ein Gas, das im flüssigen Zustand besteht, nämlich Neon in dem engen Bereich von —245,9° bis —248,7°. Man kann es bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs gefrieren lassen und dabei durch Abpumpen von Helium reinigen, was mit den Neon-Heliumgemischen zu geschehen pflegt, die bei großen Luftverflüssigungsanlagen als Rückstände in dem Gegenstromapparat gewonnen werden. Die Temperaturen zwischen —217° und —253° muß man mit den Dämpfen von flüssigem Wasserstoff erzeugen. Da dieser bisher noch nicht wie flüssige Luft von technischen Anlagen zu beziehen ist, müssen physikalische Laboratorien für ihren Gebrauch den Wasserstoff selbst verflüssigen. Einen kleinen Apparat dazu hat NERNST[31]) angegeben.

Bäder aus flüssiger Luft, mit denen man bis —210° gelangt, bei welcher Temperatur der Stickstoff fest ausfällt, haben den Nachteil, daß sie infolge der schnelleren Verdampfung des Stickstoffs ihre Zusammensetzung und damit ihren Siedepunkt ändern: sie werden wärmer.

Bäder aus flüssigem Helium sind in Leiden seit 1908 in Gebrauch. Das Gas wird in ähnlicher Weise wie Wasserstoff verflüssigt, wobei mit flüssigem Wasserstoff bis auf —258° vorgekühlt wird. Die Bäder reichen über den Bereich von —268,8° bis —272°. Diese Temperaturen wurden teils mit einem Heliumthermometer konstanten Volumens bestimmt, dessen Anfangsdruck bei 0° nur 145 mm Quecksilber betrug, teils mit dem Dampfdruckthermometer.

Inzwischen ist Helium auch in Toronto und in der P.-T. Reichsanstalt verflüssigt worden.

Als Fixpunkt kommt für tiefe Temperaturen der Schmelzpunkt des Quecksilbers in Betracht, das leicht rein darzustellen ist. Der Punkt ist von mehreren Beobachtern übereinstimmend zu —38,87° bestimmt worden. Bis zu dieser Temperatur abwärts ist die quadratische Formel für das Platinwiderstandsthermometer noch gültig. Für die tiefen Schmelzpunkte organischer Stoffe zeigen die Messungen verschiedener Forscher keine große Übereinstimmung, was wohl in mangelnder Reinheit seinen Grund hat. Auch ist die große Unterkühlung, die bei diesen Stoffen aufzutreten pflegt, für eine genaue Bestimmung hinderlich.

So bleiben nur die Siedepunkte übrig, die nach dem statischen Verfahren mit dem Dampfdruckthermometer gemessen werden (S. 116). Die Reinheit ist für Kohlensäure und Sauerstoff leicht zu erreichen.

Erstere gewinnt man aus dem Schnee der käuflichen Bomben, die ma ins Vakuum verdampfen läßt, dann in flüssiger Luft wieder kondensie und den Niederschlag abpumpt. Auch im Vakuum erhitztes Natriun bikarbonat liefert ein reines Gas. Sauerstoff wird durch Erwärmur von Kaliumpermanganat dargestellt und nötigenfalls durch Konde sation mit flüssiger Luft gereinigt.

Elftes Kapitel.

Wärmemenge.

Nach dem deutschen Gesetz gelten als Einheiten der Wärmemenge c Kilokalorie (kcal) und die Kilowattstunde (kWh). Dabei wird unter d Kilokalorie diejenige Wärmemenge verstanden, die 1 kg Wasser bei Atn sphärendruck von 14,5° auf 15,5° erwärmt. Der tausendste Teil dav ist die Kalorie (cal), mit welcher der Physiker meistens rechnet. Es 1 cal = 4,184 Wattsek. oder Joule.

Andere Einheiten haben nur noch historische Bedeutung. Es ist einr die mittlere Kalorie, der hundertste Teil der Wärmemenge, die 1 g Was von 0° auf 100° erwärmt, und sodann die REGNAULTsche Kalorie, Wärmemenge, die 1 g Wasser von 0° auf 1° bringt. Die erste ist in c Grenzen ihrer Genauigkeit der Kalorie von 15° gleich zu erachten, zweite ist gleich 1,008 cal.

1. Wasserkalorimeter.

Zur Messung von Wärmemengen Q führt man sie in ein Kalorim ein. Steigt dessen Temperatur dadurch von θ_1 auf θ_2 und ist der Was wert oder die Wärmekapazität dieses Apparats W (cal/Grad), ergibt sich: $Q = (\theta_2 - \theta_1) W$. Am meisten gebraucht wird das Was kalorimeter, das die Grundlage für die Messung von Wärmemer bildet.

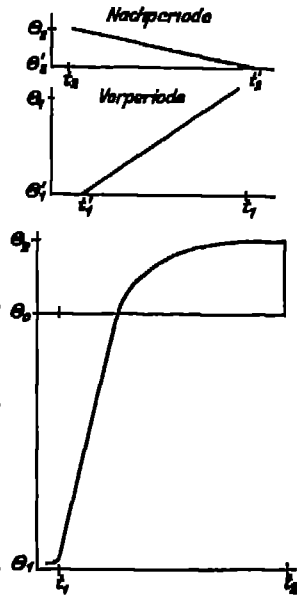
Das Wasser befindet sich in einem Zylinder aus Metallblech, der seitig von Luft umgeben zum Wärmeschutz auf Korkschneiden in ei weiteren Mantel steht. Dieser besitzt zweckmäßig doppelte Wände, d Zwischenraum eine reichliche Wassermenge faßt. Durch den Deckel Mantels ragen in das Kalorimeter ein in $^1/_{10}$° geteiltes Quecksilberthe meter und ein Rührer; außerdem muß eine verschließbare Öffnung Einführen des erwärmten Körpers vorgesehen sein. Vielfach we Vakuummantelgefäße als Kalorimeter benutzt, die mit einem D versehen und unmittelbar in ein Bad eingetaucht werden. Die Größ

erhöhung 5° nicht überschreitet, damit die Korrektion, welche der Einfluß der Außentemperatur bedingt, nicht zu groß wird.

Angenähert wird dieser Einfluß nach RUMFORD (1812) dadurch eliminiert, daß man vor dem Versuch das Kalorimeter so tief unter die Temperatur der Umgebung abkühlt, wie es am Ende darüber steht. Genauer ist das folgende Verfahren.

Man kühlt das Kalorimeter einige Grade unter die Außentemperatur, d. h. die des Wassermantels ab und beobachtet, nachdem sich die Temperatur hinreichend ausgeglichen hat, in einer Vorperiode von Minute zu Minute das Thermometer des Kalorimeters, das langsam steigt. Dann wird die Temperatur, nachdem die zu messende Wärme zugeführt wurde, schneller zunehmen — man beobachtet während dieser Periode in kürzeren Abschnitten — und schließlich sich wieder gleichmäßig langsam ändern, was in einer Nachperiode nochmals von Minute zu Minute abgelesen wird. Dem Beginn und dem Ende der Vor-, Haupt- und Nachperiode mögen die Temperaturen θ_1', θ_1, θ_2, θ_2' und die Zeiten t_1', t_1, t_2 und t_2' entsprechen. Dann ist der Zuwachs $\Delta\theta$, den die Kalorimetertemperatur θ in der Minute erfährt: in der Vorperiode $\frac{\theta_1 - \theta_1'}{t_1 - t_1'}$ und in der Nachperiode $\frac{\theta_2' - \theta_2}{t_2' - t_2}$. Die Erfahrung lehrt, daß $\Delta\theta$ linear von θ abhängt. Man kann also leicht für die Temperatur θ jeder Minute der Hauptperiode das zugehörige $\Delta\theta$ interpolieren. Am einfachsten geschieht das graphisch; auf demselben Wege leitet man auch $\Delta\theta$ für die Vor- und Nachperiode unter Auftragung aller Ablesungen ab und überzeugt sich von dem regelmäßigen Gange dieser Korrektion. Sie wird negativ, wenn θ über die Außentemperatur θ_0 steigt, da alsdann das Kalorimeter Wärme abgibt. Die Gesamtkorrektion beträgt $\sum_n \Delta\theta$, wenn die Hauptperiode n Minuten beträgt (Fig. 80).

Fig. 80. Kalorimetertemperatur.

Um das Anbringen einer Korrektion zu vermeiden, führt man wohl dem Mantel ebenfalls eine Wärmemenge zu, und zwar in der Weise, daß seine Temperatur mit der des Kalorimeters parallel ansteigt, was vor dem eigentlichen Versuch auszuprobieren ist. Zu dem Zweck läßt sich eine chemische Reaktion verwenden, z. B. die Mischung einer Säure mit einer

RICHARDS 1905). Die Manteltemperatur θ_m wird zunächst so einreguliert, daß die Kalorimetertemperatur θ_k konstant bleibt, und der Versuch dann so geleitet, daß sich bei steigenden θ_k und θ_m der Unterschied $\theta_m - \theta_k = \tau$ nicht ändert. Wird diese Bedingung nicht genau eingehalten, beträgt vielmehr in den n aufeinanderfolgenden Minuten der Unterschied $\tau + \Delta\tau_1$, $\tau + \Delta\tau_2$, ..., so ist an der Zunahme von θ_k die Korrektion $\varepsilon \sum_n \Delta\tau$ anzubringen, wo ε die Änderung bedeutet, die θ_k in einer Minute erfährt, wenn der Mantel auf der Temperatur $\theta_m + 1°$ gehalten wird[1]).

Zur Bestimmung des Wasserwerts eines Kalorimeters sind verschiedene Verfahren im Gebrauch. Am einfachsten ist es, ihn aus dem Gewicht des Wassers und der übrigen Bestandteile zu berechnen, wobei das Gewicht des Metallgefäßes und des Rührers mit der spezifischen Wärme multipliziert den Wasserwert dieser Teile ergibt. Hierzu kommt noch das Thermometer, dessen eintauchendes Volumen (in cm^3), multipliziert mit 0,46, als Wasserwert zu rechnen ist, wenn es sich um ein Stabthermometer handelt, da sich Glas und Quecksilber nach Volumen berechnet im Wasserwert nicht unterscheiden. Den Wasserwert eines Einschlußthermometers muß man mit einem kleinen Hilfskalorimeter empirisch ermitteln.

Genauer wird der Wasserwert in der Weise bestimmt, daß man dem Kalorimeter eine bekannte Wärmemenge zuführt, die entweder durch einen chemischen Prozeß oder auf elektrischem Wege erzeugt wird. Dabei wird der Einfluß herausragender Teile des Kalorimeters, besonders solcher Apparate, die nicht genau nach außen abgegrenzt sind, wie si für die Messung strömender Flüssigkeiten und Gase gebraucht werden besser berücksichtigt. In diesem Falle spielt die Art der Kalorimeter flüssigkeit keine Rolle; vielmehr wird man oft dem Wasser eine isolierend Flüssigkeit vorziehen, weil sie für die elektrische Heizung den Vorte bietet, daß man den Heizwiderstand nackt eintauchen kann, während (im Wasser isoliert und abgeschlossen werden muß. Mit der Wahl ein andern Kalorimeterflüssigkeit ist man ferner nicht mehr an einen eng Temperaturbereich gebunden wie bei Wasser, sondern kann z. B. mit (auch bei höherer Temperatur Wärmemengen messen.

Die in t Sekunden von einem elektrischen Strom I entwickelte Wärm menge (in cal) ist gleich dem Produkt aus Leistung N (in Watt) u Zeit, also

$$Q = 0{,}239\,Nt = 0{,}239\,I^2Rt = 0{,}239\,EIt,$$

wenn R den Heizwiderstand und E die Spannung an seinen Klemm bezeichnet. Zweckmäßig ist die Messung von Strom und Spannu da der Heizwiderstand unter der Stromeinwirkung veränderlich zu se

pflegt. Der Einfluß der Außentemperatur auf das Kalorimeter muß in der angegebenen Weise berücksichtigt werden

Die Wärmekapazität J des Wassers in elektrischen Einheiten sowie deren Änderung mit der Temperatur haben viele Beobachter gemessen. Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse von JAEGER und v. STEINWEHR[2]), die mit einem geschlossenen Kalorimeter von 50 l Inhalt arbeiteten, so daß der Einfluß des Metalls von Gefäß und Rührer gering war Um ferner die Korrektion wegen des Wärmeaustausches mit der Umgebung klein zu halten, wurde das Kalorimeter nur wenig über die Außentemperatur erwärmt und der Unterschied genau mit dem Widerstandsthermometer gemessen.

θ	J (Joule)	J/J_{15}
5°	4,197	1,0029
10	4,190	1,0013
15	4,184	1,0000
20	4,180	0,9990
25	4,177	0,9983
30	4,175	0,9979
35	4,175	$0{,}9978_5$
40	4,176	$0{,}9981_5$
45	4,179	0,9987
50	4,182	0,9996

Von der Wasserwertsbestimmung durch eine chemische Reaktion macht man am häufigsten in der Thermochemie bei dem BERTHELOTschen Verbrennungskalorimeter Gebrauch. Der Apparat dient zur Messung von Verbrennungswärmen, also jenen Wärmetönungen, die bei der Verbindung von Stoffen, meist organischer Art, mit Sauerstoff auftreten. Die Reaktion geht vor sich in einer starkwandigen Bombe aus Stahl, die sich nebst Rührer und Thermometer in dem Wasser des Kalorimetergefäßes befindet. Der Deckel der Bombe, der unter Einfügung eines Bleirings dicht aufgeschraubt wird, trägt an einem Halter ein Platinschälchen, das eine abgewogene Menge des zu verbrennenden Stoffes in Pastillenform aufnimmt. Darüber befindet sich ein dünner Eisendraht, der mittels einer im Deckel isolierten Zuleitung elektrisch zum Glühen gebracht die Verbrennung einleitet, zu deren Unterhaltung Sauerstoff bei einem Druck von etwa 50 Atm. eingeführt worden ist. Die Bombenwand ist innen mit Platin oder Emaille ausgekleidet, wenn sie nicht aus rostfreiem Stahl besteht. Einige Tropfen Wasser, in die Bombe gebracht, bewirken, daß sich aller bei der Verbrennung entstehende Wasserdampf kondensiert (Fig. 81).

Verbrennungswärme von Normalstoffen, die zur Eichung der Ver brennungskalorimeter tauglich sind, haben FISCHER und WREDE[3] sowie DICKINSON[4]) bestimmt. Ihre Messungen, die HENNING[5]) mit denen früherer Forscher zusammengestellt hat, beziehen sich auf Rohrzucker Naphthalin und Benzoesäure, von denen sich die letzte Verbindung am besten für den Zwec eignet. Für die Verbrennungswärme von 1 Benzoesäure (das Gewicht auf das Vakuum be zogen) ist hiernach 26 456 Joule = 6323 cal an zunehmen[6]).

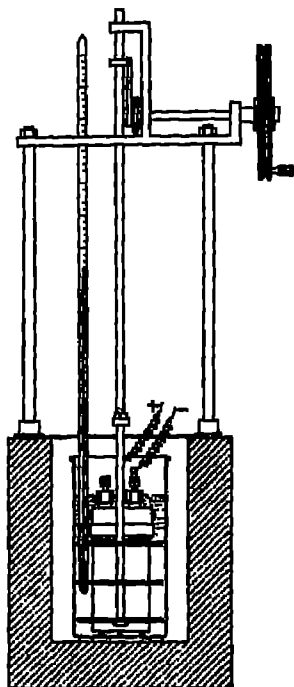



Fig. 81. Verbrennungskalorimeter.

FAVRE und SILBERMANN (1852) bildeten di Kalorimeter zugleich als Thermometer aus u beobachteten die Ausdehnung der Kalorimete flüssigkeit, wobei meist Quecksilber das Wass ersetzte, in einer an das Kalorimetergefäß a gesetzten Glasröhre. SCHOTTKY[7]) benutzte I tiefer Temperatur Pentan als Füllung. E solcher Apparat wird geeicht, indem ein Kör von bekanntem Wärmeinhalt eingeführt wi Als solcher kann das Thermophor (ANDRE 1845)[8]) dienen: ein Quecksilberthermometer i einem Gefäß von 10—20 cm³ Inhalt und ei 1—2 mm weiten Kapillare, die mehrere Mark besitzt. Man erhitzt das Gefäß auf etwa 90°, daß das Quecksilber über die oberste Ma steigt, taucht es schnell in das Kalorimeter e sobald während des Abkühlens die Kuppe oberste Marke erreicht, und läßt es so la darin, bis das Quecksilber auf einer unteren Marke einsteht. Der Appa wird mit einem Wasserkalorimeter geeicht.

2. Eiskalorimeter.

Die Wärme erhöht nicht allein die Temperatur der Körper, son bewirkt auch die Änderung ihres Zustandes: sie bringt feste Stoffe z Schmelzen und flüssige zum Sieden. Hierbei wird eine bestimmte Wär menge gebunden, die man auch zur Messung von Wärmemengen benu

³) E. FISCHER u. F. WREDE, ZS. phys. Chemie 69, 218. 1909 u. 75, 81.
⁴) H. C. DICKINSON, Bull. Bur. Stand. 11, 190. 1915.
⁵) F. HENNING, ZS. phys. Chem. 97, 467. 1921.
⁶) W. JAEGER u. H. v. STEINWEHR, ebd. 114, 59. 1924.

Das Eiskalorimeter (BLACK, etwa 1760) beruht darauf, daß durch die zugeführte Wärmemenge eine bestimmte Eismenge geschmolzen wird: je 79,67 cal = 333,3 Joule schmelzen 1 g Eis[9]). Das alte Verfahren (LAVOISIER und LAPLACE), das Schmelzwasser zu wägen, ersetzten H. R. HERMANN (1834) und später BUNSEN (1870) durch die Messung der Volumenabnahme, die beim Schmelzen eintritt. Das Eis befindet sich in einem Glaszylinder Z, wo es eine dünnwandige Röhre R umgibt, in welche die zu messende Wärmemenge eingeführt wird (Fig. 82). Vor dem Versuch bringt man in dem Apparat ausgekochtes Wasser durch eine Kältemischung zum Gefrieren. Der Zylinder Z bildet den einen Schenkel eines U-Rohres, dessen anderer U durch Quecksilber abgesperrt ist, welches in ein Skalenrohr S hineinragt, wo der Stand der Kuppe beobachtet wird. Das Ganze ist durch einen doppelten Eismantel M und N gegen Wärmezufuhr von außen geschützt. 1 g Eis von 0° nimmt den Raum von $1{,}0907_5$ cm³ ein, 1 g Wasser von 0° nur 1,0001³ cm, einer Volumenabnahme von 1 cm³ entspricht also eine geschmolzene Eismenge von 1/0,0906 = $11{,}03_5$ g und einer zugeführten Wärmemenge von $11{,}03_5 \cdot 79{,}67 = 879$ cal.

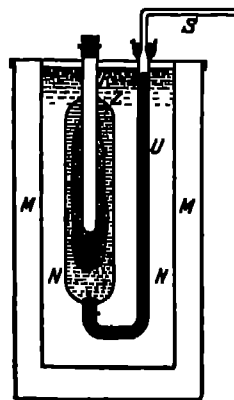



Fig. 82. Eiskalorimeter.

Statt die in das Eisgefäß eingesaugte Quecksilbermenge in einem Meßrohr abzulesen, zieht man es nach dem Vorgang von SCHULLER und WARTHA (1877) vor, sie zu wägen. Zu diesem Zweck ist das Quecksilberrohr S nach abwärts gebogen und mündet mit einer abgeschliffenen feinen Spitze in eine mit Quecksilber gefüllte Schale, deren Verlust durch Wägung bestimmt wird. Bei der Zuführung von 1 cal werden $0{,}0154_6$ g Quecksilber eingesaugt[10]).

Das Eiskalorimeter zeigt auch im unbenutzten Zustande meist einen gewissen Gang, der wegen geringer Verunreinigungen des Eismantels noch nach langem Stehen anhält. Man kann dem entgegenwirken durch Änderung des Druckes im Eiszylinder, indem die mit Quecksilber gefüllte Schale verstellt wird. Jedenfalls ist das Kalorimeter vor und nach dem Versuch zu beobachten und eine Korrektion wegen des freiwilligen Ganges anzubringen.

---

[9]) DICKINSON, HARPER u. OSBORNE, Bull. Bur. Stand. 10, 235. 1914 u. 12, 49. 1915.

[10]) O. DIETERICI, Ann. Phys. 16, 593. 1905; U. BEHN, ebd. 16, 653. 1905; E. GRIFFITHS, Proc. Roy. Soc. 26, 1. 1913.

3. Verdampfungskalorimeter.

Die Verdampfungswärme des Wassers haben Joly (1886) und Bunsen (1887) zur Messung von Wärmemengen benutzt: bei der Verdichtung von 1 g Dampf zu Wasser werden bei Atmosphärendruck 530,1 cal frei, die dem Kalorimeter entzogen werden, wenn man einen kalten Körper in eine Dampfatmosphäre bringt und sich so viel Dampf auf ihn kondensieren läßt, daß er auf die Temperatur des Dampfbades erwärmt ist. Das Gewicht des niedergeschlagenen Wasserdampfes gibt ein Maß für die Wärmemenge, die zur Temperaturerhöhung des Körpers notwendig ist.

Der Versuch wird in der Weise angestellt, daß zunächst der kalte Körper, der mit einem Draht an einer Wage in einer Rudbergschen Röhre hängt, in Luft gewogen, daß alsdann plötzlich Dampf in die Röhre geleitet und die Wägung des um den niedergeschlagenen Dampf vermehrten Gewichts in einem mäßigen Dampfstrome wiederholt wird. Beträgt diese Gewichtszunahme a g, so sind 530,1 a cal dem Dampf entzogen, die den kalten Körper auf die Temperatur des Dampfes gebracht haben.

Umgekehrt hat Dewar Körper durch Eintauchen in siedenden Sauerstoff oder Wasserstoff abgekühlt und aus der Menge der verdampften Flüssigkeit die dazu notwendige Wärmemenge bestimmt.

4. Metallkalorimeter.

Die Messungen mit dem Kalorimeter bezwecken vielfach die Bestimmung der spezifischen Wärme. Handelt es sich z. B. um die Untersuchung fester Körper, so bringt man sie mit einer von dem Wasserkalorimeter verschiedenen Temperatur in diesen Apparat und beobachtet dessen Temperaturveränderung. Aus mancherlei Gründen läßt sich dabei der Temperaturunterschied zwischen Kalorimeter und zu untersuchendem Körper nicht klein wählen. Denn einmal bewegt sich die Kalorimetertemperatur in engen Grenzen und ist weit entfernt von derjenigen hoch erhitzter oder tiefabgekühlter Körper, sodann ist die Wärmekapazität des Wassers groß gegenüber derjenigen fester Körper, und man muß diesen Unterschied durch eine große Temperaturverschiedenheit zwischen Kalorimeter und Körper ausgleichen, wenn die Temperaturänderung des Kalorimeters genau meßbar sein soll. Daher erhält man für die spezifische Wärme nur einen Integralwert zwischen weiten Temperaturgrenzen. Zur Bestimmung von Differentialwerten sind Kalorimeter von kleinerem Wasserwert nötig, deren Temperatur sich in weiten Grenzen variieren läßt.

Für diesen Zweck hat Gaede (1902) Metallkalorimeter eingeführt die später von Nernst (1910) namentlich für die Messung bei tiefe

steht aus einem massiven Stück K Metall von gutem Wärmeleitvermögen, das durch eine eingebettete Drahtwicklung elektrisch geheizt werden kann. Die Temperatur wird ebenfalls elektrisch entweder mit einem Widerstandsthermometer oder mit einem Thermoelement gemessen. Der Rührer fällt weg, die Temperatur gleicht sich durch die Wärmeleitung aus. Zur Verringerung des Wärmeaustausches mit der Umgebung hängt das Kalorimeter K an den Zuleitungen zur Heizspule in einem evakuierten Glasgefäß G, das in ein Temperaturbad gebracht wird (Fig. 83). Für tiefe Temperatur ist die Anordnung besonders zweckmäßig, weil hier die Wärmeleitung groß und die Strahlung gering ist. Man erwärmt das Kalorimeter nur wenige Grade über seine Umgebung. Aus Metallen, deren spezifische Wärme untersucht werden soll, stellt man unmittelbar das Kalorimeter her, andere Stoffe füllt man in dickwandige Kupferzylinder.

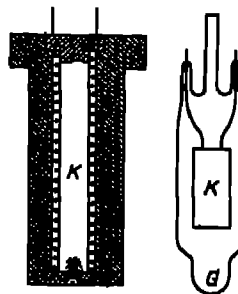



Fig. 83. Metallkalorimeter.

Mit einer solchen Anordnung haben z. B. DICKINSON und OSBORNE[11]) die spezifische Wärme c des Eises bis — 40° gemessen. Sie fanden $c = 0{,}505 + 0{,}00180\,\vartheta$ cal · g⁻¹ · Grad⁻¹. Bis — 250° haben NERNST[12]) und seine Schüler[13]) die spezifische Wärme von Metallen usw. verfolgt, in Leiden[14]) wurde die Untersuchung auf festen und flüssigen Stickstoff und Wasserstoff ausgedehnt und auf Quecksilber bis — 270°.

5. Spezifische Wärme von Flüssigkeiten und Gasen.

Die spezifische Wärme von Flüssigkeiten wird untersucht, indem man ein Kalorimeter damit füllt oder indem man sie in Gefäße einschließt und dann wie feste Körper behandelt. Für Gase ist das erste Verfahren gar nicht, das zweite auch nur mit Einschränkung brauchbar, nämlich wenn es sich um die Untersuchung stark komprimierter Gase handelt. Aber selbst dann macht die Wärmekapazität des Gasinhalts höchstens 10% von derjenigen der Metallhülle aus, so daß die genaue Bestimmung der ersteren nicht leicht ist. JOLY[15]) hat eine solche mit dem Dampfkalorimeter ausgeführt: zwei kupferne Hohlkugeln von je 7 cm Durchmesser hingen an der Wage und wurden zunächst in Luft von Zimmertemperatur beide leer, dann die eine leer und die andere, mit dem Gase von 30 Atm. Druck gefüllt, verglichen; die letzte Wägung wurde schließ-

[11]) H. C. DICKINSON u. N. S. OSBORNE, Bull. Bur. Stand. 12, 49. 1915.

[12]) W. NERNST, Ann. Phys. 36, 395. 1911.

[13]) P. GÜNTHER, ebd. 51, 828. 1916.

[14]) H. KAMERLINGH ONNES u. G. HOLST, Comm. Leiden 142c. 1914.

lich in der Wasserdampfatmosphäre wiederholt. Eine Korrektion bedingt die Ausdehnung der Kugeln und der dadurch vergrößerte Auftrieb im Dampf

Anders verhält es sich mit dem Metallkalorimeter, mit dem EUCKEN[16]) die spezifische Wärme komprimierten Wasserstoffs bei tiefer Temperatur beobachtete. Das Gas wurde in ein dünnwandiges Stahlgefäß gefüllt, das mit einer Heizwicklung über die Außentemperatur erwärmt werden konnte. Wegen der Abnahme der spezifischen Wärme fester Körper mit der Temperatur ist hier das Verhältnis zwischen den Wärmekapazitäten des Gefäßes und seines Inhalts günstiger. Man mißt die spezifische Wärme des Gases bei konstantem Volumen

Nach den älteren Verfahren (DELAROCHE und BÉRARD 1813) wird die spezifische Wärme der Gase bei konstantem Druck gemessen. Die Versuchsanordnung hat REGNAULT besonders ausgebildet. Das erhitzte Gas, das in einem Vorwärmer auf θ_2 erhitzt wird, fließt kurze Zeit in reichlicher Menge m durch das auf Zimmertemperatur befindliche Wasserkalorimeter und wird hier auf dessen Temperatur θ_1 abgekühlt. Für die spezifische Wärme c_p des Gases (bezogen auf 1 g) erhält man, wenn W den Wasserwert des Kalorimeters bezeichnet: $c_p = \frac{\theta_2 - \theta_1}{m} W$.
Der Temperaturunterschied $\theta_2 - \theta_1$ ist noch zu korrigieren wegen des Wärmeaustausches, der wie sonst aus Beobachtungen vor und nach dem Strömen des Gases abgeleitet wird. Er ist hier im allgemeinen größer als bei dem gewöhnlichen Kalorimeter, weil längs der Gasleitung noch Wärme an dem Vorwärmer zum Kalorimeter fließt. Der daraus entstehenden Korrektion haftet insofern eine Unsicherheit an, als die unbewiesene Annahme gemacht wird, daß die Wärmeleitung längs der Rohrleitung dieselbe ist, einerlei ob das Gas strömt oder nicht. Man kann nur Vorsorge treffen, daß diese Wärmezuleitung überhaupt gering bleibt, indem man den Wärmewiderstand der Übergangsstelle zum Kalorimeter groß wählt, die Rohrleitung also dort aus schlecht leitendem Stoff, wie Glas oder Neusilber, herstellt

Zum Erwärmen des Gases benutzte REGNAULT Bäder, die der Gasstrom in Metallschlangen durchströmte. Ebensolche Rohre durchsetzen auch das Kalorimeter, an deren Wandung das Gas die Wärme wieder abgab. Nach E. WIEDEMANN kann man die langen, engen Schlangenrohre durch kurze, weitere Rohre ersetzen, die mit Silberspänen gefüllt werden. Die Gasmenge mißt man mit Kubizierapparaten, d. h. Gasometern, deren Inhalt durch Auswägen mit Wasser oder mit Gasuhren bestimmt ist.

Das Verfahren, mit dem REGNAULT die spezifischen Wärmen von Gasen bestimmt hatte, die bis 200° erhitzt wurden, ist von HOLBORN und HENNING[17]) bis 800° ausgedehnt worden. Ihr Kalorimeter, ein Zylinder aus Silberblech, faßte 2,5 l Paraffinöl, dessen Temperatur stets in der Nähe von 125° gehalten wurde, damit sich der Wasserdampf, der außer Stickstoff und Kohlensäure untersucht wurde, nicht im Kalorimeter kondensierte, Denn dadurch wäre die große Verdampfungswärme in die Messung der spezifischen Wärme eingegangen und hätte deren Ergebnis ungenauer ausfallen lassen. Das Gas wurde in einem Ofen V erhitzt, den es in einer elektrisch geheizten Schlange aus Platinrohr durchströmte, und trat dann durch das senkrecht auf dem Kalorimeter befestigte Rohr II in das Kalorimeter, wo es drei hintereinander geschaltete, mit Spänen gefüllte Silberrohre L_1, L_2, L_3 durchströmte und sich dabei auf etwa 125° wieder abkühlte. Die Temperatur des Kalorimeters wurde mit dem Quecksilberthermometer Thq und dem Platinthermometer Thp, sein Wasserwert mit Hilfe der Heizspule B_1 elektrisch gemessen. Die Gase fing man bei ihrem Austritt aus dem Kalorimeter in einem Gasometer auf, den Wasserdampf in einem kleinen Messinggefäß C, in dem das kondensierte Wasser gewogen wurde. Die Temperatur, mit der das Gas in das Kalorimeter trat, wurde mit dem dünnen Thermoelement Th aus Platin-Platinrhodium, dessen Lötstelle L dicht an das Kalorimeter hinanreichte und durch dünne Diaphragmen gegen dessen Strahlung geschützt war, gemessen. Das Rohr II aus Platinblech war doppelwandig; die beiden Wände gingen an dem einen Ende D metallisch in einander über und konnten durch einen elektrischen Strom, der an dem andern Ende der Innen- und Außenwand bei N und Q zugeleitet wurde, bis in die unmittelbare Nähe des Kalorimeters auf hoher Temperatur gehalten werden. Auf die äußere Wand dieses geheizten Rohres war an dem ersten Ende noch ein weiterer Mantel Pt aus Platinblech geschweißt, der ein Stück darüber hinausragte und mit einem Flansch unter Zwischenlage einer Gummi- und Asbestdichtung G, As mit dem Kalorimeterdeckel gasdicht verschraubt war. Dieser Mantel war gegen die Strahlung des geheizten Rohrs durch einen Zylinder M aus Magnesia geschützt (Fig. 84).

Eingehend wurde untersucht, welchen Einfluß die Dicke des Thermoelements Th auf die Temperaturmessung des Gases ausübte. Man ging bis zu Drahtstärken von 0,02 mm hinunter, die freilich jedesmal nur wenige Beobachtungen aushielten, und prüfte, wie die Gastemperatur mit der Abnahme der Drahtdicke stieg, da die Lötstellen im Verhältnis

zu ihrer Ausdehnung immer weniger Wärme durch Strahlung abgab. Bei Drahtdicken unter 0,1 mm blieb der Unterschied unter 1%.

Die Erwärmung des Kalorimeters durch das Gaszuleitungsrohr wurde zum großen Teil dadurch kompensiert, daß die Temperatur des Kalori-

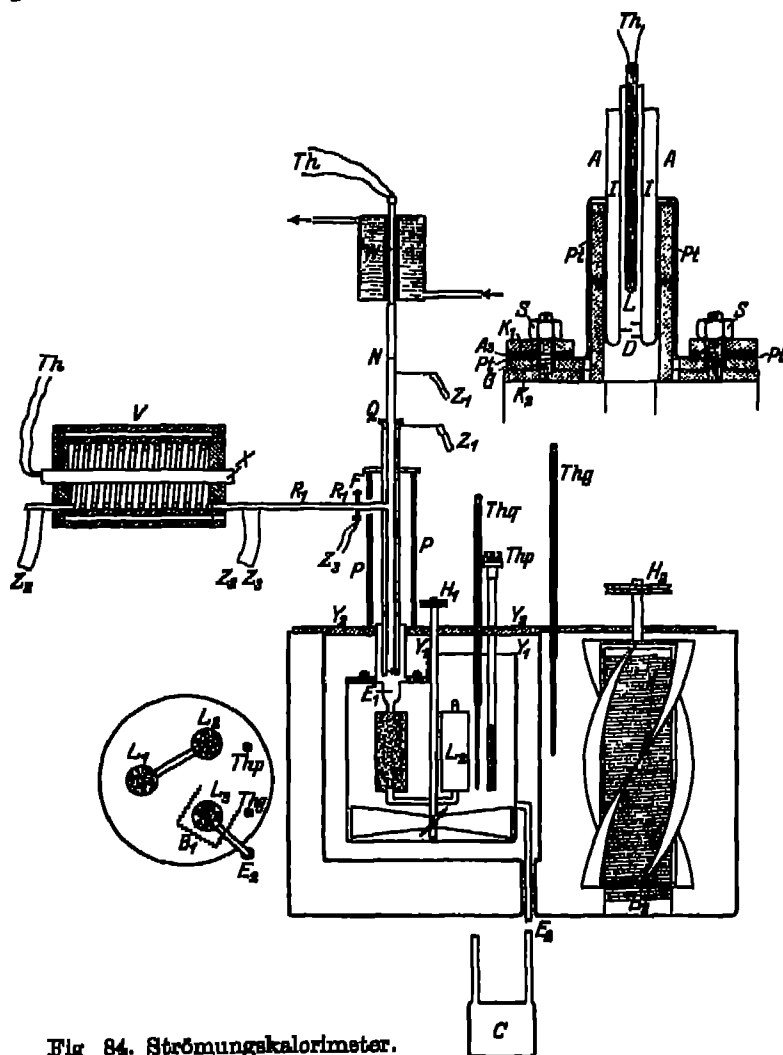



Fig 84. Strömungskalorimeter.

metermantels, der ebenfalls mit Öl gefüllt war und durch eine auf den Rührer H_2 gewickelte Spule B_2 elektrisch geheizt werden konnte, wesentlich unter der des Kalorimeters gehalten wurde. Auf diese Weise ließ sich dessen Temperaturgang, der wie gewöhnlich in einer Vor- und einer Nach-

Das Verfahren, dem Kalorimeter die Flussigkeit oder das Gas in andauerndem Strome zuzuleiten, rührt von CALLENDAR (1902) her, der es zuerst auf die Bestimmung der spezifischen Wärme des Wassers anwandte. Die Flüssigkeit durchfließt eine 2 mm weite Glaskapillare von 50 cm Länge und wird auf diesem Wege von dem durch einen Platindraht eingeführten elektrischen Strom erwärmt. An den Enden, wo sich die Kapillare erweitert, befinden sich Platinthermometer, mit denen die Temperaturen θ_1 und θ_2 des Wassers bei dem Ein- und Austritt gemessen werden. Das Strömungsrohr wird von einem Vakuummantel umgeben, der in ein Bad eintaucht, das die Eintrittstemperatur θ_1 besitzt. Fließen im Beharrungszustande m g Wasser durch die Röhre und ist N die Leistung des zugeführten elektrischen Stromes, ν die dem Wärmeverlust an die Umgebung entsprechende Leistung und c die spezifische Wärme des Wassers, so erhält man.

$$c = \frac{N - \nu}{m(\theta_2 - \theta_1)}.$$

ν wird dadurch eliminiert, daß man m und N variiert und auf $m = \infty$ extrapoliert.

Auf Gase haben SWANN (1909) sowie SCHEEL und HEUSE[18]) das Verfahren angewandt. Die Anordnung der beiden letzten Beobachter zeigt Fig. 85. Das zu messende Gas durchströmt ein Kalorimeter aus Glas, das von einem versilberten Vakuummantel umgeben ist. Bei dem Eintritt wird die Temperatur des Gases mit dem Platinthermometer P_1 gemessen, bei dem Austritt mit P_2. Dazwischen durchfließt das Gas die konzentrischen Mäntel B und C, welche das Rohr A umschließen, in dem

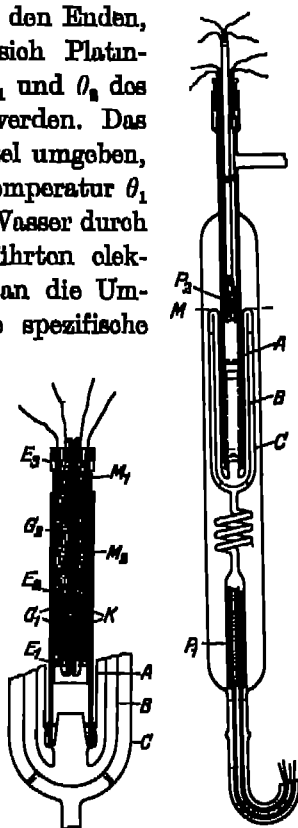



Fig. 85. Strömungskalorimeter.

sich der Heizwiderstand aus Konstantandraht befindet, dessen Verluste durch diese Gegenstromanordnung sehr herabgesetzt werden. Zur gründlichen Durchmischung des erwärmten Gases ist der Heizwiderstand von Packungen aus feiner Kupfergaze G_1 G_2 umgeben. Der Kalorimetermantel war bei Zimmertemperatur von einem Wasserbade, bei tiefer Temperatur von einem Bade flüssigen Sauerstoffs oder einer Mischung von fester Kohlensäure und Alkohol umgeben. Das Gas durchströmte den Apparat in einem geschlossenen Kreislaufe mit kon-

stanter Geschwindigkeit, die durch eine von einem Motor bewegte Quecksilberpumpe unterhalten wurde. Zur Messung der in der Sekunde das Kalorimeter durchströmenden Menge wurde mit dem Chronographen die Zeit ermittelt, in welcher ein bestimmtes Gasvolumen aus einer Kugel durch Quecksilber verdrängt und in den Kreislauf übergeführt wurde.

Eines in den Grundzügen ähnlichen Verfahrens bedienten sich HOLBORN und JAKOB[19]), um die Abhängigkeit der spezifischen Wärme der Luft vom Druck zu bestimmen. Entsprechend seiner Verwendung für Drucke bis 200 Atm. bestand das Kalorimeter aus einem senkrecht stehenden Zylinder aus Nickelstahl von 45 cm Durchmesser und 10 cm Durchmesser, der allseitig von Öl umgeben war, das elektrisch auf 100° geheizt und kräftig gerührt wurde. Zum Wärmeschutz war das Ganze von einem weiteren Mantel umgeben, der durch den Dampf siedenden Wassers ebenfalls auf 100° gehalten wurde Die komprimierte Luft von etwa 20° wurde dem Stahlzylinder in konstantem Strome unten zugeleitet und strömte oben mit 100° aus, nachdem sie dazwischen einen Heizwiderstand aus Nickelrohren passiert hatte. Danach wurde sie entspannt und in einem Gasometer bei Zimmertemperatur die auf die Zeiteinheit entfallende Menge gemessen. Es kamen Mengen bis zu 40 kg/h zur Verwendung, deren gleichmäßige Förderung sich mit dem elektrisch angetriebenen Kompressor durch Regelung der Drehzahl erreichen ließ. Entgegen den Ergebnissen REGNAULTS, der bei der Anwendung von Drucken bis 13 Atm. keine Abhängigkeit der spezifischen Wärme vom Druck p gefunden hatte, wurde festgestellt, daß sich c_p für 60° nach folgender Gleichung ändert:

$$10^4 c_p = 2413 + 2{,}86\, p + 0{,}000\,5\, p^2 - 0{,}000\,01\, p^3.$$

Der Wert, der sich aus dieser Gleichung für $p = 1$ Atm. ergibt, ist größer als der REGNAULTsche (2375), steht jedoch mit allen Ergebnissen in Übereinstimmung, welche die neueren Versuche mit dauernder Strömung aufweisen.

Endlich hat das Verfahren der dauernden Strömung noch eine wichtige Anwendung gefunden für die Bestimmung der spezifischen Wärme des Wasserdampfes und ihrer Abhängigkeit von Druck und Temperatur, die KNOBLAUCH[20]) mit seinen Mitarbeitern in weiten Grenzen durchgeführt hat. Die Beobachtungen erstreckten sich bis 30 Atm. und 350°, wobei der Wasserdampf im Kalorimeter um etwa 30° bis 50° erhitzt wurde, so daß das Ergebnis für das mäßig große Temperaturintervall

[19]) L. HOLBORN u. M. JAKOB, Forschungsarb. Ver. d. Ing., Heft 187 u. 188. 1916.

[20]) O. KNOBLAUCH u. M. JAKOB, Forschungsarb. Ver. d. Ing., Heft 35 u. 36. 1906; O. KNOBLAUCH u. H. MOLLIER, ebd. Heft 108 u. 109. 1911; O. KNOBLAUCH u. A. WINKHAUS, ebd. Heft 195. 1917; O. KNOBLAUCH u. E RAISCH, ZS. Ver. d. Ing.

der wahren spezifischen Wärme gleichkam. Benutzt wurden Dampfmengen bis 50 kg/h, die nach dem Austritt aus dem Kalorimeter kondensiert und dann gewogen wurden.

6. Explosionsverfahren.

Unsere Kenntnis über die spezifischen Wärmen der Gase bei hohen Temperaturen beruht auf Messung nach dem Explosionsverfahren (Bunsen 1867, Mallard und Le Chatelier 1883). Ein brennbares Gasgemisch wird bei der Temperatur θ_1 in einer Stahlbombe von etwa 30 l Inhalt entzündet Bei der adiabatischen Verbrennung wird die Verbindungswärme Q frei, die sich nach den vorhandenen Bestandteilen angeben läßt, und erhitzt das Verbrennungsprodukt m und die vorhandene indifferente Gasmenge m′ auf die Temperatur θ_2, die schnell abfällt, weil die Wärme an die kalte Wand übergeht. Sind c_v und c_v' die mittleren spezifischen Wärmen zwischen θ_1 und θ_2 des Verbrennungsproduktes und des indifferenten Gases, so gilt: $Q = (\theta_2 - \theta_1)(m\, c_v + m'\, c_v')$.

Die Temperatur θ_2 berechnet man aus dem maximalen Druck p_2, der bei der Explosion erreicht wird. Denn ist der Anfangsdruck $p_1 = n_1 R T_1/V$, wo n die Anzahl der Mole, so erhält man für den Enddruck $p_2 = n_2 R T_2/V$. Durch Veränderung des Verhältnisses m/m′ läßt sich θ_2 finden.

Die Bombe befindet sich zweckmäßig in einem Wasserbade und besitzt oben und unten Bohrungen, durch deren eine isoliert die Zünddrähte genau bis zur Mitte, und durch deren andere Rohre für die Zuleitung der Gase eingeschraubt sind. Vor der Füllung wird evakuiert und der Partialdruck der eingeführten Gase gemessen. Die Hauptschwierigkeit liegt in der Messung des maximalen Drucks nach der Explosion. Das Manometer mit Bourdonscher Röhre und der Indikator, die man früher benutzte, um den Gasdruck der Bombe zu registrieren, waren wegen der Eigenschwingungen ihrer Systeme, die in den Druckkurven auftraten, nicht geeignet. Besser verhält sich eine gewellte Stahlmembran von 0,1 mm Dicke und 5 cm Durchmesser, die Pier[21]) in die Wandung der Bombe einsetzte. Ihre Durchbiegung wird durch eine Spiegelübertragung vergrößert und photographisch mit Hilfe einer Bogenlampe auf eine rotierende Trommel aufgezeichnet. Die Membran wird statisch geeicht, indem man die Bombe an eine mit flüssiger Kohlensäure gefüllte Flasche legt und den Druck mit einem Manometer bestimmt.

Je höher die Temperaturen, um so merklicher werden die Wärmeverluste, die man dadurch schätzen kann, daß der Anfangsdruck der Gasfüllung variiert wird.

[illegible]

Nach dem Vorschlag von J J. THOMSON wurden Explosionsdruck durch die piezoelektrische Ladung von Turmalinkristallen gemessen[22]) die dem allseitigen Druck proportional ist und $1,86 \cdot 10^{-2}$ elektrostatische Einheiten/Atm. beträgt. Eine Anzahl Kristalle wird in der Explosions kammer mit den positiven Polen an eine Metallplatte gelegt und deren Ladung mit der BRAUNschen Röhre beobachtet, worin ein mit der Platt verbundener Kondensator die Kathodenstrahlen ablenkt. Die Erschei nung wird auf einer photographischen Platte registriert und die Ab lenkung des Bildes dadurch ausgewertet, daß die Explosionskamme auf einen bekannten statischen Druck gebracht wird. Ein mit dem elek trostatischen Felde paralleles magnetisches, das durch einen Wechsel strom bekannter Frequenz erzeugt wird, liefert senkrecht zu der elek trischen Ablenkung Verschiebungen des Bildes, welche als Zeitmarke dienen.

7. $\varkappa = \frac{c_p}{c_v}$ der Gase.

Eng verknüpft mit der Messung der spezifischen Wärme von Gase sind die Untersuchungen, welche das Verhältnis $\varkappa$ der spezifische Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen betreffen Denn aus dem Verhältnis $\varkappa = c_p/c_v$ läßt sich mit der für ideale Gase gül tigen Beziehung: $M(c_p - c_v) = R = 8,313 \cdot 10^7$ Erg $= 1,986$ cal die Größ c_p oder c_v berechnen. Hierzu bedarf es allerdings genauer Werte von $\varkappa$

Die bei der adiabatischen Ausdehnung eines Gases geleistete Arbei wird durch eine Abkühlung kompensiert, die natürlich der spezifische Wärme umgekehrt proportional ist. Bei diesem Vorgang bleiben di Ausdrücke $pv^\varkappa$ und $Tv^{\varkappa-1}$ konstant. Aus zwei Zuständen ergibt sic also $\varkappa$ nach folgenden Gleichungen.

$$\varkappa = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log v_2 - \log v_1} \quad \text{und} \quad \varkappa = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log p_1 - \log p_2 - (\log T_1 - \log T_2)}.$$

Nach CLÉMENT und DESORMES (1819) unterwirft man eine große Ga masse in einem Gefäß von 60 bis 80 l Inhalt einer kleinen Druckänderung die an einem Manometer abgelesen wird, indem ein etwa 2 cm² weite Hahn geöffnet wird, durch den das unter einem Überdruck von etwa 5 bi 10 cm Quecksilber stehende Gas in die Atmosphäre ausströmt. Zur Be obachtung der Abkühlung, die 10° bis 15° beträgt, kann ein empfindliche Widerstandsthermometer in Form eines dünnen Bolometerstreifens au Platinfolie (LUMMER und PRINGSHEIM 1898) oder ein feines Thermoele ment dienen, die mitten im Gefäß hängen und der Temperatur des Gase

[22]) D. A. KEYS, Phil. Mag. 42, 473. 1921; J. C. KARCHER, Sc. Papers Bu

schnell folgen. Der Einfluß der Strahlung, den die von einem Wasserbade umgebene Gefäßwand auf das Thermometer ausübt, wird dadurch bestimmt, daß man es sowohl blank als auch geschwärzt anwendet, wodurch das Absorptionsvermögen um mehr als das Zehnfache variiert wird. $\varkappa$ läßt sich dann nach der zweiten Gleichung berechnen.

Einfacher, aber weniger übersichtlich in bezug auf die Fehlerquellen ist das ältere Verfahren, wo man das Gasgefäß selbst als Luftthermometer benutzt, deshalb den Hahn sogleich nach raschem Öffnen wieder schließt und wartet, bis sich die Anfangstemperatur hergestellt hat. Das Gas möge zuletzt den Druck p_3 besitzen. Da $v_2/v_1 = p_1/p_3$, so ist $\varkappa = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log p_1 - \log p_3}$. Zur Beobachtung der Druckunterschiede eignet sich die Platte eines Aneroidbarometers, die man in die Wandung des Gefäßes einsetzt und mit Spiegel und Skale beobachtet (RÖNTGEN 1873).

Ferner läßt sich $\varkappa$ in einem Gase durch die Messung der Schallgeschwindigkeit u bestimmen. Für das Gas von 0° und dem Druck von etwa 1 Atm. gilt $u^2 = -\varkappa \frac{v^2}{M}\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = \varkappa \frac{p^2 v^2}{MRT} = \varkappa \frac{p}{s} \frac{pv}{(pv)_0}$, also $\varkappa = u^2 \frac{s}{p} \frac{(pv)_0}{pv}$, wo v das Molvolumen, M das Molekulargewicht, s die Dichte, R die Gaskonstante, p den Druck (in Bar) und $(pv)_0$ den Wert von pv für $p = 0$ bezeichnet.

Für den Grenzwert $\varkappa_0$, der für den Zustand starker Verdünnung ($p = 0$), also für das ideale Gas abzuleiten ist, bedarf es noch einer geringen Korrektion, für deren Berechnung man die D. BERTHELOTsche Zustandsgleichung zugrunde zu legen pflegt. Für Wasserstoff ($\varkappa =$ 1,408) ist die Korrektion zu vernachlässigen, für Luft sinkt der Wert dadurch von 1,403 auf 1,402.

In dem Gase, das in ein Rohr eingeschlossen wird, erzeugt man stehende Wellen von bekannter Schwingungszahl N. Ist λ die Wellenlänge, so folgt $u = \lambda N$. Meistens wird mit Luft verglichen. Ist λ_L die Wellenlänge in Luft und λ_x im Gase, ferner d_x dessen Dichte, bezogen auf Luft, so erhält man für das Gas: $\varkappa_x = \frac{\lambda_x^2}{\lambda_L^2} d_x \cdot \varkappa_L$, wo $\varkappa_L$ das Verhältnis der spezifischen Wärmen für Luft, gleich 1,403 zu setzen ist.

Die stehenden Schwingungen einer Gassäule werden nach KUNDT (1866) durch Lykopodiumpulver oder Kieselsäure sichtbar gemacht, die gleichmäßig im ganzen Rohre verteilt werden. Ist das Gas eingelassen, so schmilzt man das Rohr von etwa 1 m Länge und 3 bis 4 cm Weite zu, unterstützt es in seiner Mitte durch eine Klammer und sucht es durch

Scharfe Staubfiguren entstehen nur, wenn Gassäule und Rohr in Resonanz stehen. Daher stimmten es BEHN und GEIGER[23]) ab, indem sie an seine Enden Metallscheiben kitteten und dadurch N änderten, bis sich der Staub in regelmäßigen Wellen anordnete. Auch durch Änderung der Temperatur läßt sich oft eine Besserung erzielen. Mit dem einen Ende ragt das Rohr in ein etwas weiteres, das auf der andern Seite durch einen verschiebbaren Korkstempel verschlossen ist Seine Lage wird so lange verändert, bis auch in diesem mit Luft gefullten Rohre die Staubfiguren hervortreten. Aus den Abständen der Knoten $a_1\, a_2\, a_3 \ldots a_n$ berechnet sich alsdann die halbe Wellenlänge nach der Formel·

$$\frac{1}{2}\lambda = 6\,\frac{(n-1)(a_n-a_1)+(n-3)(a_{n-1}-a_2)+\ \ldots}{n(n^2-1)}.$$

Das Verfahren hat den Vorzug, daß es nur eine geringe Gasmenge benötigt und leicht auf beliebige Drucke und Temperaturen auszudehnen ist. KUNDT und WARBURG (1876) beobachteten danach in hoher Temperatur den einatomigen Quecksilberdampf und fanden den von der Theorie geforderten Wert von 1,67, der später auch für die Edelgase nachgewiesen wurde.

THIESEN (1907) benutzte für denselben Zweck den geschlossenen Resonator und bestimmte die Frequenz, bei welcher Resonanz auftritt. Die hierfür als Schallquelle dienende Sirene ersetzten GRÜNEISEN und MERKEL[24]) durch einen Tonsender, dessen Schwingungszahl sich bequem im Bereich von 700 bis 46 000 sec^{-1} auf einige Zehntausendstel einstellen läßt. Als Resonatoren dienten Messingrohre bis 5 cm Weite, deren Enden durch dünne Membranen aus Neusilber oder Glimmer verschlossen waren (Fig. 86). Sie grenzten Vorräume ab, wovon dem einen der Ton des vom Tonsender induktiv erregten Telephons zugeleitet,

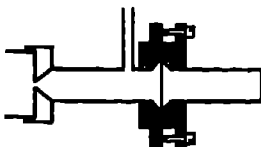



Fig. 86 Resonatorverschluß.

während er am andern durch einen Schlauch vom Ohre des Beobachters abgenommen wurde. Durch die Öffnungen an den Enden werden die benachbarten Halbwellen etwas beeinflußt, was bei absoluten Messungen durch die Verwendung von Rohren verschiedener Länge L eliminiert wird. Ferner läßt sich der Einfluß der Reibung und der Wärmeleitung des Gases, der auch bei dem KUNDTschen Verfahren auftritt, durch

[23]) U BEHN und H. GEIGER, Verh. D Phys. Ges. 1907, 657; J. R. PARTINGTON und CANT, Phil. Mag. 43, 369. 1922; G. SCHWEIKERT, Ann. Phys. 48, 593 u. 49, 433. 1915/16; W. RÜCKER, ebd. 65, 393. 1921.

die Benutzung von Rohren verschiedenen Durchmessers ausschließen. Man beobachtet Resonanz bei der Wellenlänge $\lambda = \frac{u}{N} = \frac{2L}{\nu}$, wo ν die Reihe der ganzen Zahlen durchläuft.

8. Schmelz- und Verdampfungswärme.

Noch mehr als die Messung der spezifischen Wärmen wird die der Schmelz- und Verdampfungswärmen durch die Temperatur des Wasser- und des Eiskalorimeters erschwert, wenn die Schmelz- und Siedepunkte der zu messenden Stoffe weit von der Zimmertemperatur entfernt liegen. In solchen Fällen bestimmt man vielfach die Gesamtwärmen, indem zu der Schmelz- oder Verdampfungswärme noch der Wärmeinhalt des Körpers zwischen jenen Punkten und der Kalorimetertemperatur hinzukommt.

Die Schmelzwärme des Eises haben DICKINSON, HARPER und OSBORNE[25]) nach zwei Verfahren mit dem Wasserkalorimeter bestimmt: einmal nach der Mischungsmethode, wobei das in einem Kryostaten trocken gehaltene Eis nach dem Einbringen ins Wasser des Kalorimeters schmilzt und dessen Temperatur erniedrigt, sodann in der Weise, daß gleichzeitig mit der Einführung des Eises der Strom einer im Kalorimeter befindlichen Heizspule geschlossen wird, so daß sich die Temperatur während des Schmelzvorgangs nur wenig ändert.

Die Verdampfungswärme des Wassers ist mehrfach, besonders von REGNAULT (1847), dadurch bestimmt worden, daß der Dampf ins Wasserkalorimeter geleitet und dort kondensiert wurde. Dabei wird natürlich die Gesamtwärme gemessen, von der die spezifische Wärme über das Gebiet bis zum Siedepunkt abzuziehen ist. Genauer ist das Verfahren, die Wärmemenge unmittelbar zu ermitteln, die zum Verdampfen der Flüssigkeit notwendig ist. Hiernach hat HENNING[26]) die Verdampfungswärme des Wassers zwischen 30° und 180° bestimmt. Das Verdampfungsgefäß, bei den Versuchen über 100° ein starkwandiger Kessel aus Rotguß, wird durch einen elektrisch geheizten, mit Öl gefüllten Mantel auf konstanter Siedetemperatur gehalten. In einer besonderen Heizspule wird durch die Stromwärme EIt die Dampfmenge m erzeugt, wobei das Kalorimeter durch Strahlung und Leitung noch die Wärmemenge Q empfange. Alsdann gilt für die Verdampfungswärme : $r = \frac{EIt + Q}{m}$.
Indem man den Wärmestand des Kalorimeters mit dem Mantel konstant

[25]) H. C. DICKINSON, D. R. HARPER u. N. S. OSBORNE, Bull. Bur. Stand. 10, 235. 1913.

hält, variiert man die Stromleistung E I und erhält alsdann eine Reihe von Gleichungen, aus denen sich Q eliminieren läßt. Um eine bestimmte verdampfte Menge abzugrenzen, sitzt an dem Auslaß des sonst verschlossenen Verdampfungsgefäßes ein Verzweigungshahn, mit dem sich der Dampfstrom beliebig auf einen der beiden Kondensbehälter augenblicklich umstellen läßt, deren Inhalt dann gewogen wird.

Die Verdampfungswärme des Wassers r bei 0° hat DIETERICI[27]) mit dem Eiskalorimeter gemessen. Eine gewogene Wassermenge befand sich im Kalorimeter, verdampfte dort unter geringem Druck. Die dem Apparat entzogene Wärmemenge wurde durch das ausgestoßene Quecksilber gemessen und der Dampf durch eine Kältemischung wieder kondensiert. Die Verdampfungswärme läßt sich zwischen 0° und 180° darstellen durch die Gleichung

$$r = 539{,}1 - 0{,}6428\,(\theta - 100) - 0{,}000\,834\,(\theta - 100)^2 \text{ cal.}$$

Dasselbe Kalorimeter benutzte WÜST[28]) zur Messung der spezifischen Wärme und der Schmelzwärme von Metallen und ihren Legierungen. Sie wurden in einem elektrischen Vakuumofen erhitzt und dann bei bekannter Temperatur in das Kalorimeter fallengelassen. Es wurden also Gesamtwärmen gemessen und daraus die Schmelzwärmen berechnet.

WEHNELT und MUSCELEANU[29]) haben die Verdampfungswärme von Metallen dadurch bestimmt, daß diese als Anoden in Entladungsrohren verdampft wurden. Als Kathode diente ein mit Calciumoxyd überzogenes Platinblech, so daß verhältnismäßig starke Ströme angewandt werden konnten. Die aufgewendete elektrische Energie ist wegen der Strahlung des Metalls, das einen kleinen Eisentiegel füllte, zu korrigieren. Auch hier wird die Gesamtwärme gemessen.

Die Verdampfungswärme verflüssigter Gase ist ebenfalls durch elektrische Heizung bestimmt worden, so z. B. die des flüssigen Wasserstoffs von KEESOM[30]). Die Flüssigkeit befand sich in einem Vakuummantelgefäß, das wiederum von einem zweiten, ebenfalls mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Gefäß umgeben war. Der Dampf wird aufgefangen und seine Menge aus dem Volumen bestimmt einmal in einer Vor- und Nachperiode, sodann in der Hauptperiode, wo die im Wasserstoff befindliche Spule einen Strom von bekannter Stärke führt.

---

[27]) C. DIETERICI, Wied. Ann. 37, 494. 1905.

[28]) F. WÜST, Forschungsarb. Ver. d. Ing., Heft 204. 1918 u. Heft 241. 1921.

[29]) A. WEHNELT u. CHR. MUSCELEANU, Verh. D. phys. Ges. 1912, 1032.

[30]) W. H. KEESOM, Comm. Leiden Nr. 137e. 1911.

Zwölftes Kapitel

Ausdehnung.

Die Körper ändern durch die Erwärmung ihr Volumen, und zwar nimmt dieses, von wenigen Fällen abgesehen, im allgemeinen zu. Soweit die Ausdehnung gewisser Stoffe als ein Merkmal für die Temperatur der Körper benutzt wird, ist der Gegenstand schon in der Thermometrie behandelt. Es bleibt noch übrig, die Ausdehnung fester Körper und Flüssigkeiten zu betrachten, die nicht die Temperaturmessung betrifft.

Nimmt das Volumen v eines Körpers bei der Erwärmung von t_1 auf t_2 um Δ v zu, so ist $\Delta v/(t_2 - t_1)v$ der mittlere kubische Ausdehnungskoeffizient für die Temperatur $\frac{1}{2}(t_1 + t_2)$, und nimmt die Länge l des festen Körpers unter gleichen Bedingungen um Δl zu, so ist entsprechend $\Delta l/(t_2 - t_1)l = \alpha$ der mittlere lineare Ausdehnungskoeffizient. Bis auf Größen zweiter Ordnung ist der kubische Koeffizient isotroper Körper gleich dem Dreifachen des linearen. Sieht man von den tiefsten Temperaturen ab, so läßt sich die Ausdehnung $\Delta l/l$ fester Körper in weiten Temperaturgrenzen als eine quadratische Funktion darstellen: $\frac{\Delta l}{l} = \alpha_1 t + \alpha_2 t^2$, so daß man für den Ausdehnungskoeffizienten erhält: $\alpha = \frac{1}{l}\frac{dl}{dt} = \alpha_1 + 2\alpha_2 t$. In tiefer Temperatur nimmt der Ausdehnungskoeffizient der regulär kristallisierenden Stoffe wie die spezifische Wärme ab und wird in der Nähe des absoluten Nullpunktes verschwindend klein.

1. Feste Körper.

Einrichtungen, bei denen die absolute Ausdehnung von Stäben mit dem Fühlhebel gemessen wird, leiden an dem Übelstand, daß sich der Hebel und das Widerlager mit erwärmen und dadurch ändern. Einwandfreiere Ergebnisse liefert das Verfahren, auf die Enden des Stabes Mikroskope einzustellen, die unabhängig von der Heizvorrichtung an einem Komparator angebracht sind. Da es sich um die Beobachtung kleiner Längenänderungen handelt, braucht man die Mikroskope meistens nicht zu verschieben, sondern mißt die Lagenänderung der Teilstriche mit dem Okularmikrometer. Für die Ausdehnung in dem Temperaturbereich zwischen 0° und 100°, auf welchen sich die Beobachtungen lange Zeit beschränkten, benutzte man Wasserbäder, die durch Fenster gegen die Mikroskope abgeschlossen waren. Fig. 87 stellt die Anordnung[1]) dar, mit welcher die Ausdehnung von Metallen zum erstenmal bis 1000° gemessen werden konnte. Die Probestäbe von 0,5 m Länge wurden in einem elek-

trischen Ofen, der eine 0,8 m lange Heizwicklung aus Nickeldraht besaß, auf die gewünschte Temperatur erhitzt, welche mit dem Thermoelement beobachtet wurde. Mit diesem ließ sich die Temperatur auf der ganzen Länge des Stabes abtasten und die Ungleichmäßigkeit des Luftbades durch die Bildung des Mittels eliminieren. Einige Teilstriche, die an jedem Ende in der Stabachse gezogen waren, visierte man von unten durch Schaulöcher in den Ofenhüllen mit Mikroskopen an, die auf einer Invarschiene befestigt, noch durch einen mit Wasser gespülten Schirm vor Erwärmung geschützt waren. Mit derselben Einrichtung wurden auch Stäbe aus Thermometerglas bis 500° sowie Porzellan und Quarzglas bis 1000° gemessen. Der Ausdehnungskoeffizient des letzten Stoffes,

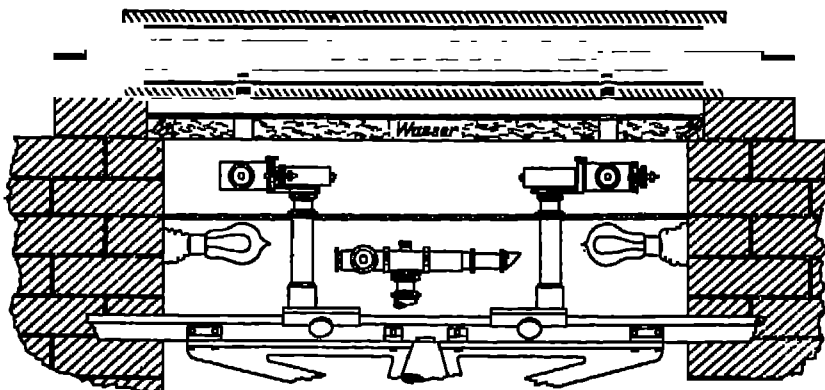



Fig. 87. Komparator für die Bestimmung der Ausdehnung.

der sich bisher als der kleinste erwiesen hat, nimmt auch bei hoher Temperatur nicht sehr zu; unter 0° weist er ein Minimum auf und wächst dann mit abnehmender Temperatur.

Später[2]) ist das Verfahren auf die Bestimmung der Ausdehnung von Iridium und Platiniridium bis 1750° ausgedehnt worden. Diese Metalle werden in Gestalt von Bändern, die schwach gespannt waren, mit Strom beschickt und dadurch unmittelbar erhitzt. Ihre Temperatur maß man mit dem optischen Pyrometer unter Berücksichtigung des Emissionsvermögens.

Gray (1912) sucht das Anvisieren glühender Teilungen dadurch zu umgehen, daß er den zu messenden Stab zwischen vertikal gespannte feine Drähte bringt, die aus dem Bade und dem Ofen herausragen und deren Abstandsänderungen er an Stellen beobachtet, wo Zimmertemperatur herrscht.

Auch die Ausdehnung in tiefer Temperatur ist mit dem Komparator absolut gemessen worden. Der Probestab befand sich in einem Rohr mit Fenstern, das von einem Bade flüssigen Sauerstoffs oder einer Mischung von Alkohol und fester Kohlensäure umgeben war[3]).

Sehr vereinfacht werden die Messungen, wenn man die Ausdehnung nicht absolut, sondern relativ gegen die eines Stabes von bekanntem Verhalten bestimmt. Als Vergleichskörper dient zweckmäßig wegen seiner geringen Ausdehnung ein Körper aus Quarzglas, der die Form eines Rohres von 50 cm Länge und 0,5 cm Weite erhält, welches auf seinem Boden eine stumpfe angeschmolzene Spitze besitzt. Auf diese wird der Versuchskörper A, ein zylindrischer Stab von 25 cm Länge gestellt und auf ihn mittels einer Spitze wieder ein Stab B aus Quarzglas, der ebenso wie das Rohr auf dem abgeschliffenen Ende eine Teilung trägt. Man taucht das Ganze etwa bis zur Mitte des oberen Stabes in das Temperaturbad und beobachtet die durch die Erwärmung bewirkte Verschiebung der beiden Teilungen gegeneinander mit einem Mikroskop[4]). Zu dieser ist noch die Ausdehnung des Quarzglases hinzuzufügen. Sie verläuft in tiefer Temperatur ungleichmäßig und entspricht der Gleichung

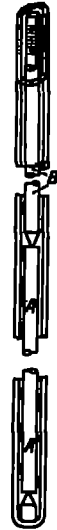
$$l_t = l_0 (1 + 0{,}0_6 362\, t - 0{,}0_8 181\, t^2 + 0{,}0_{11} 340\, t^3)$$

zwischen $-253°$ und $+100°$, darüber hinaus kann mit dem konstanten linearen Ausdehnungskoeffizienten $5{,}5 \cdot 10^{-7}$ gerechnet werden.

Fig. 88. Differentialdilatometer.

Auch der Fühlhebel kann zur Messung solcher relativer Ausdehnung benutzt werden; seine Drehung wird mit Doppelspiegel und Skale beobachtet. Die Versuchsanordnung kann hierbei je nach der Form und dem Zweck der Probestäbe verschieden ausgeführt werden[5]).

Der Vorschlag, die Ausdehnung unmittelbar in Wellenlängen des Lichts auszuwerten und dadurch absolut zu messen, rührt von FIZEAU (1864) her, der danach auch eine große Reihe Messungen angestellt hat; ABBE (1884)[6]) schuf dann ein Instrument, wodurch das Verfahren wesentlich verbessert und vereinfacht worden ist. Ursprünglich wurde ein auf drei Stellschrauben ruhendes Tischchen T (Fig. 89) benutzt, auf welchem der Versuchskörper a, ein Zylinder mit plan geschliffener oberer End-

---

[3]) K. SCHEEL u. W. HEUSE, Verh. D. phys. Ges. 1907, 449.

[4]) F. HENNING, Ann. Phys. 22, 631. 1907.

[5]) W. VOIGT, Wied. Ann. 43, 830. 1891; E. GRÜNEISEN, Ann. Phys. 33, 33. 1910.

fläche, mittels dreier Spitzen ruhte; dicht darüber lag auf den Schraube die Deckglasplatte P mit ebenen Flächen. Bei der Beleuchtung von obe mit einfarbigem Licht entstanden dann in dem Luftkeil zwischen Platt und Versuchskörper, der dünn gewählt wurde, d Interferenzstreifen gleicher Dicke, die sich bei der E wärmung infolge der Ausdehnung von Stellschraube und Deckglas bewegten, die Verschiebung des Streifei systems wurde an einer Marke der Unterseite des Deol glases beobachtet. Bedeuten α und l den gesuchte Ausdehnungskoeffizienten und die Länge des Prob körpers, α_0 und l_0 dieselben Größen für die Stellschrauben, n d Zahl der an der Marke vorübergewanderten Streifen bei Beleuchtu mit Licht von der Wellenlänge λ während der Erwärmung von t_1 a t_2, so erhält man für die Dickenänderung Δ d der Luftschicht:

Fig. 89. Fizeausches Tischchen.

$$\Delta d = n\frac{\lambda}{2} = (\alpha_0 l_0 - \alpha l)(t_2 - t_1) \text{ oder } \alpha = \frac{\alpha_0 l_0}{l} - \frac{n\lambda}{2l(t_2 - t_1)}.$$

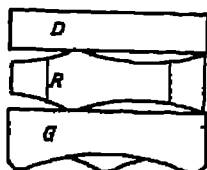
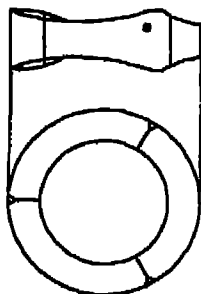
Die Ausdehnung α_0 der Schrauben wird bestimmt, indem man d Tischchen umkehrt, das Deckglas wieder auf die Schrauben legt u Interferenzstreifen zwischen der Unterseite des Dec glases und der ebenen Fläche des Tischchens erzeug

Das Tischchen und die Stellschrauben waren aus Pl tin angefertigt. Als dann der Versuch, statt dessen Sta zu nehmen, wegen der thermischen Nachwirkung dieses Metalls nicht befriedigte, ersetzte Pulfrich d Tischchen durch einen Ring aus Bergkristall od Quarzglas, in welchen der Versuchskörper hinei gestellt wird. Fig. 90a und b zeigen diese Anor nung: G ist die Bodenplatte, deren obere Seite plan u deren untere Seite gewölbt und schwarz lackiert i damit sie keine störenden Spiegelbilder gibt; der Ring von 30 und 45 mm innerem und äußerem Durc messer hat an der Unter- und Oberseite je drei Fü chen, deren kleine Endflächen in einer Ebene liege die Deckplatte D ist schwach keilförmig geschliffe damit das an ihrer Oberseite entstehende Spiegelbild a dem Gesichtsfeld herausfällt; ebenso der Ring, dan bei der absoluten Messung des Ringes, wo der Versuc körper entfernt wird, in der Luftschicht von etwa 15 mm Dicke zwisch Deck- und Bodenplatte ein Interferenzbild entstehen kann.

Fig. 90. Pulfrichscher Quarzring.

Das System der Quarzkörper wird in einen allseitig geschlossen

mit dem man je nach der gewünschten Temperatur wechselt; diese wird zweckmäßig mit einem neben dem Quarzring angebrachten Widerstandsthermometer gemessen. Das horizontale Beobachtungsrohr ist auf Autokollimation eingerichtet und besitzt als Lichtquelle ein Geißlersches Rohr R. Fig. 91 zeigt schematisch den Strahlengang: nach dem Durchgang durch die Linse O fällt das Licht auf das Reflexionsprisma P, welches das Rohr über dem Quarzsystem Q abschließt, wird an diesem reflektiert, kehrt auf demselben Wege zurück und gelangt durch ein Beobachtungsrohr mit geradsichtigem, dispergierendem Prisma P_1 in das Auge des Beobachters. Das Rohr ist um eine vertikale Achse durch eine Mikrometerschraube zu drehen, so daß sich die Streifenbreite und der Abstand des nächsten Streifens von einem auf der Unterseite der Deckplatte angebrachten Silberscheibchen auf etwa 1% ermitteln läßt. Man beobachtet nach ABBE mit verschiedenen Wellenlängen und leitet die ganzen Viel-

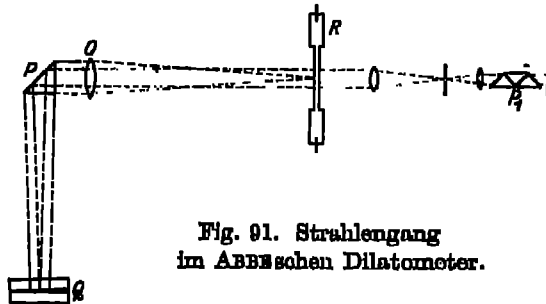



Fig. 91. Strahlengang im ABBEschen Dilatometer.

fachen der verschobenen Streifen aus dem Verhältnis der Wellenlängen der benutzten Lichtarten ab, so daß sich die Beobachtung der Wanderung der Streifen während der Erwärmung erübrigt. Wird ein Geißlersches Rohr verwendet, das Helium und Quecksilber enthält, so hat man ungefähr ein Dutzend Wellenlängen zur Verfügung.

Die optische Dicke der Luftschicht wird nicht allein durch die Ausdehnung des Quarzringes und des Probekörpers, sondern auch durch die Temperatur und den Barometerstand geändert. Deshalb ist an der Dickenänderung Δd eine Korrektion $k = -\frac{2d}{\lambda}(n_2 - n_1)$ anzubringen, wo n_1 und n_2 die Brechungskoeffizienten der Luft bei den Temperaturen t_1 und t_2 und den Drucken p_1 und p_2 bedeuten. Bei dicken Luftschichten, also bei der absoluten Messung des Quarzringes, wird die Genauigkeit namentlich in tiefer Temperatur durch die Messung im Vakuum sehr erhöht. Bezeichnet n_0 den Brechungskoeffizienten der Luft bei 0° und dem normalen Barometerstande p_0, so erhält man:

$$(n_0 - 1) \left(273\, p_2 \qquad 273\, p_1 \right)$$

Das Beobachtungsverfahren ist in weiten Temperaturgrenzen ang wandt worden: nach unten bis zur Temperatur des siedenden Wass stoffs, nach oben bis 1000°, wo in den elektrisch geheizten Luftbäde die geringe Größe des Quarzsystems sehr am Platze ist[7]).

Um die Ausdehnung eines Probestücks relativ gegen die eines Körp A von bekannter Ausdehnung zu messen, legt PRIEST[8]) die Deckgl platte D einerseits auf eine Schneide S_1 des Körpers, andererseits a die Spitze S_2 eines kleinen Probestücks von etwa 1 cm Höhe und bec achtet die Interferenzen in dem Luftzwischenraum, dessen obere Begre zung bei einer verschiedenen Ausdehnung der Vergleichsstücke ihre N gung ändert (Fig. 92).

Im allgemeinen läßt sich die Ausdehnung zusammengesetzter Stof nicht die der Verbindungen aus den Ausdehnungen der Bestandte nach der Mischungsregel berechnen. I auffallende Tatsache, daß für die Ausd nung mancher einfacher Stoffe von v schiedenen Beobachtern stark voneinan abweichende Werte gefunden worden si erklärt sich daraus, daß es sich um pc kristalline Proben nichtregulärer Eleme von besonderer Anisotropie handelte. Neu Versuche an Einkristallen solcher Sto z. B. der hexagonal kristallisierenden Met Zink und Kadmium, haben den großen Unterschied der Ausdehnur koeffizienten parallel und senkrecht zu der hexagonalen Achse erken lassen[9]). Daß sich die nichtregulären Kristalle nach verschiedenen Ri tungen verschieden ausdehnen, hatte schon MITSCHERLICH (1824) zeigt, und FIZEAU hatte dafür viele Beweise mit seinem Beobachtur verfahren geliefert.

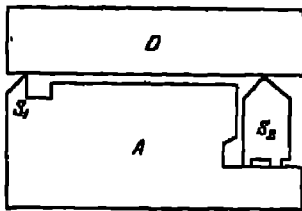



Fig. 92. Differentialdilatometer.

3. Flüssigkeiten.

DULONG und PETIT (1818) haben die Ausdehnung von Flüssigke unabhängig von den sie einschließenden Gefäßen nach dem Verfal der kommunizierenden Röhren gemessen, welches darauf beruht, die Längen zweier miteinander kommunizierenden Flüssigkeitssäu die sich das Gleichgewicht halten, im umgekehrten Verhältnis i Dichten stehen. REGNAULT (1847) benutzte die Methode in der W daß er die Längen der beiden Säulen nahezu gleich machte und d

[7]) K. SCHEEL, Verh. D. Phys. Ges. 1907, 3 u. 717; 1914, 1; ZS. f. Phys. 5, 1921. — H. RANDALL, Phys. Rev. 30, 216. 1910
[8]) C. PRIEST, Bull. Bur. Stand. 15, 669. 1920.

ihren ungleichen Druck mit einem Differentialmanometer verglich. Quecksilber und Wasser, deren Ausdehnung schon wegen der praktischen Verwendung dieser Flüssigkeiten für die Auswägung von Gefäßen besonders wichtig ist, wurden auf diese Weise gemessen. die erste von REGNAULT, CALLENDAR und MOSS[10]) und CHAPPUIS[11]), die andere von THIESEN, SCHEEL und DIESSELHORST[12]). Diese verglichen die Schwere zweier Wassersäulen von je 2 m Länge, von denen die eine L_1 auf der Temperatur der Umgebung, die andere L_2 auf einer andern, zwischen 0° und 100° wechselnden durch Bäder gehalten wurde. Die oberen Enden der vertikalen Wasserrohre waren durch ein horizontales, offenes Rohr R verbunden, in die untere Verbindung war das Differentialmanometer M eingeschaltet, in welchem der Höhenunterschied der Wasserkuppen mit Mikroskopen an Teilungen abzulesen war, deren Striche sich an den Flüssigkeitsoberflächen spiegelten. Bezeichnen L_1, L_2 und l die Länge der Wassersäulen in den Bädern und im Manometer, d_1, d_2 und d die entsprechenden Dichten und γ die Dichte der Luft im Manometer (Fig. 93), so ist

$$d_1 - d_2 = \frac{l(d-\gamma)}{L_1} + \frac{L_2 - L_1}{L_2}(d_1 - d).$$

Fig. 93. Kommunizierende Röhren auf verschiedener Temperatur.

Zwischen 0° und 100° ließ sich die Dichte des Wassers darstellen durch die Formel

$$1 - d = \frac{(t - 3{,}982)^2}{466\,700} \cdot \frac{t + 273}{t + 67} \cdot \frac{350 - t}{365 - t}.$$

Alle folgenden Verfahren zur Bestimmung der Flüssigkeitsausdehnung setzen die Ausdehnung eines festen Körpers als bekannt voraus. Das gebräuchlichste benutzt als Dilatometer ein Glasgefäß von Thermometerform, also ein weiteres Gefäß mit angesetztem engeren und geteilten Rohr, dessen Volumen durch Auswägung mit Wasser oder Quecksilber bestimmt wird. Nimmt eine zu messende Flüssigkeit bei t_1 das Volumen v_1 des Gefäßes ein und dehnt sie sich bei t_2 auf v_2 aus, bezeichnet ferner 3β den kubischen Ausdehnungskoeffizienten des Gefäßes, so ergibt sich für den mittleren Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit:

$$\alpha = \frac{v_2 - v_1}{v_1(t_2 - t_1)} + 3\beta\frac{v_2}{v_1}.$$

---

10) H. L. CALLENDAR u. H. MOSS, Phil. Trans. A 211, 1. 1911.

11) P. CHAPPUIS, Trav. et Mém. du Bureau intern. XVI, 1917.

12) M. THIESSEN, K. SCHEEL u. H. DIESSELHORST, Wissensch. Abhandl. der

Wird ein Gefäß mit ausgezogener Spitze oder angesetzter Kapillare be vollständig mit Flüssigkeit gefüllt, deren Menge m_1 betrage, und ble nach der Erwärmung auf t_2 die Menge m_2 zurück, fließt also $m_1 - m_2$ a so gilt für ein solches Ausflußthermometer $\alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_2 (t_2 - t_1)} + 3\beta \frac{n}{n}$ Man wägt m_1 und die ausgeflossene Menge $(m_1 - m_2)$, die man in ei Schale auffängt.

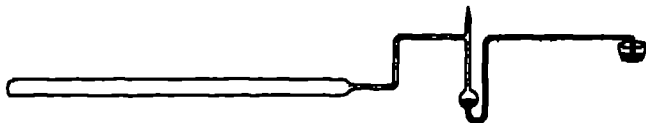



Fig. 94. Gefäßdilatometer

Auf diese Weise hat Chappuis[13]) zwischen 0° und 40° die Ausdehn des Wassers in Gefäßen aus Verre dur und Platiniridium gemessen. waren 1 m lang, so daß ihre Ausdehnung linear stimmt werden konnte. Das Wasser wurde durch e Vorlage mit Quecksilber abgesperrt, wovon die a fließende Menge gewogen wurde (Fig. 94).

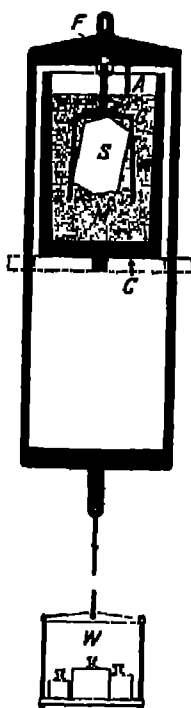



Fig. 95. Hydrostatische Wägung im Metallbad.

Man bestimmt also bei diesen Methoden zunäc die scheinbare Ausdehnung der Flüssigkeit im Ge und fügt dann dazu die Gefäßausdehnung, die anc weitig, z. B. durch eine mit dem Komparator gestellte Messung eines Stabes aus dem Stoffe des (fäßes oder durch Füllung des Gefäßes mit einer Flüs keit von bekannter Ausdehnung, zu ermitteln ist. diese Weise läßt sich auch die wahre Ausdehn von Thermometerflüssigkeiten, wie Quecksilber, Tol usw., nach Beobachtung mit gewöhnlichen Therr meterformen angeben, wenn diese vor der Füllı kalibriert und aus einem Glase von bekannter A dehnung angefertigt werden[14]).

Umständlicher, aber in manchen Fällen nicht ersetzen ist die Methode, die Ausdehnung von Flüs keiten aus der Änderung des Auftriebs zu bestimm So haben Marek sowie Thiessen die Wasserausd nung dadurch ermittelt, daß sie den Auftrieb ei Kilogramms aus Quarz beobachteten. Bis zu (höchsten Temperaturen ist diese hydrostatische

[13]) P. Chappuis, Travaux et Mém. du Bureau intern. XIII. 1904.
[14]) M. Thiessen, K. Scheel u. L. Sell, Wissensch. Abhandl. der P.-T.-Rei

stimmungsweise angewandt worden, z. B. bei geschmolzenen Salzen, in denen ein Platinkörper gewogen wird[15]). Ferner haben DAY, SOSMAN und HOSTETTER[16]) die Ausdehnung von Gesteinen dadurch gemessen, daß sie deren Auftrieb in geschmolzenem Zinn bestimmten, dessen Dichte vorher bis 1600° festgelegt war. Die Grundlage hierfür bildete die Ausdehnung von Acheson-Graphit, für dessen mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten nach komparatorischer Messung die Gleichung $\beta \cdot 10^6 = 0{,}55 + 0{,}0016\,t$ aufgestellt wurde. Der Versuchskörper S wurde im flüssigen Zinn M des Tiegels C (Fig. 95) durch eine umgekehrte Graphitschale G eingetaucht gehalten, die isoliert an einem Graphitrahmen F befestigt war. Er trug außerhalb des Ofens die Schale W für die Gewichte, die so bemessen wurden, daß die Spitze A die Zinnoberfläche berührte, was durch einen elektrischen Kontakt zu erkennen war. Die ganze Einrichtung befand sich in einem elektrisch geheizten Kohleofen, dessen Temperatur mit einem Thermoelement gemessen wurde.

Lineare Ausdehnung $10^3 \cdot \Delta l/l$ fester Körper zwischen 0° und t°.

	—190°	+100°	+300°	+500°	+700°	+1000°
Aluminium	—3,43	+2,38	7,68	13,70	—	—
Cadmium ‖[17])	—10,7	5,3	—	—	—	—
„ ⊥[18])	—3,0	2,1	—	—	—	—
Chrom	—	0,84	2,72	4,86	—	—
Flußeisen	—1,66	1,19	3,88	6,98	10,5	—
Gold	—2,50	1,43	4,49	7,61	—	—
Gußeisen	—1,61	1,04	3,45	6,31	—	—
Invar	—0,45	—	—	—	—	—
Iridium	—1,07	0,65	—	—	—	7,91
Konstantan	—2,26	1,52	4,81	8,41	—	—
Kupfer	—2,66	1,65	5,18	9,04	—	—
Magnesium	—	2,60	8,36	14,9	—	—
Mangan	—3,03	2,28	7,57	—	—	—
Molybdän	—0,79	0,52	1,64	—	—	—
Nickel	—1,88	1,30	4,30	7,7	11,0	16,8
Palladium	—1,93	1,19	3,70	6,38	9,2	13,8
Platin	—1,51	0,90	2,78	4,77	6,9	10,2
Silber	—3,21	1,97	6,08	10,4	15,1	—
Tantal	—	0,65	2,02	3,4	—	—
Wolfram	—0,73	0,45	1,40	2,3	—	—
Zink ‖[17])	—12,3	6,4	—	—	—	—
„ ⊥[18])	—1,7	1,4	—	—	—	—
Berliner Porzellan	—0,82	0,30	1,03	1,82	2,6	4,3
Jenaer Glas 16 III	—1,12	0,81	2,60	4,63	—	—
„ „ 59 III	—0,82	0,50	1,83	3,14	—	—
Bergkristall ‖[17])	—0,96	0,70	2,87	5,80	—	—
Quarzglas	+0,02	0,05	0,10	3,06	0,40	0,55

[15]) F. M. JAEGER, ZS. anorg. Chem. 101, 1. 1917.

[16]) A. L. DAY, R. B. SOSMAN u. J. C. HOSTETTER, Am. J. of Sc. (4) 37, 1. 1914 und Neues Jahrb. f. Mineral. 40, 119. 1915.

Dreizehntes Kapitel.

Schmelzen und Erstarren.

1. Schmelz- und Erstarrungspunkte.

Die Schmelz- und Erstarrungstemperaturen hängen nur in geringem Grade vom Druck ab: bei Metallen bewirkt eine Drucksteigerung um 1000 Atm. eine Erhöhung des Schmelzpunktes um höchstens 10°, bei anderen Stoffen um nicht mehr als 40°.

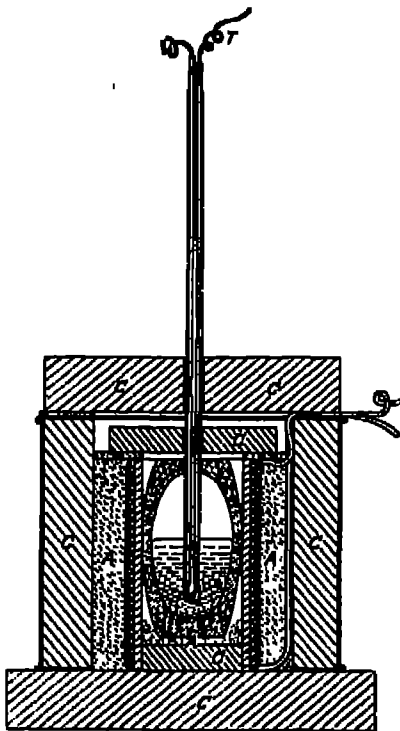



Fig. 96. Schmelzofen.

Die reinen Metalle, wie Zinn, Cadmium, Blei, Zink, Antimon, Silber und Gold, deren Schmelztemperaturen als Fixpunkte dienen, werden im elektrischen Ofen geschmolzen. Man benutzt zweckmäßig Graphittiegel, da diese am dauerhaftesten sind und die für viele Fälle notwendige reduzierende Atmosphäre bieten. Durch den gelochten Deckel wird das zu eichende Thermoelement oder Widerstandsthermometer, das durch ein dünnes Porzellanrohr geschützt ist, eingetaucht. In Fig. 96 ist eine solche Anordnung dargestellt: der Tiegel steht in der gleichmäßigen Zone der Heizspule, deren Windungen im unteren Teil dichter aufeinander folgen. Das Ganze ist durch Schamottewände C und Asbestwolle A geschützt. Das Thermoelement T ist durch Porzellanrohre isoliert.

Man beobachtet sowohl die Schmelz- als auch die Erstarrungskurve, welche die Temperatur als Funktion der Zeit darstellend während des Schmelzens oder Erstarrens des Metalls geradlinig verlaufen sollten. Gewöhnlich aber zeigen diese Kurvenabschnitte teilweise eine schwache Neigung, die bei der Schmelzkurve je nach der Schnelligkeit des Heizens größer ist als bei der Erstarrungskurve, was sich durch die Wärmezufuhr erklärt, infolge deren eine Schicht an der Tiegelwand schon geschmolzen sein kann, ehe das Thermometer in der Mitte die Schmelztemperatur erreicht hat. Bei der Abkühlung erstarrt die äußere Schicht zuerst und bildet einen Wärmeschutz für die Mitte, so daß die Tempera-

durch Konvektion schneller ausgleichen als im festen. Beachtenswert sind bei der Abkühlung die Unterkühlungen, die z. B. bei Antimon bis zu 30° anwachsen, oft aber einige Zehntelgrad nicht überschreiten. Die Temperatur steigt dann plötzlich auf den Erstarrungspunkt. Man stellt mehrere Beobachtungen des Schmelz- und des Erstarrungspunktes hintereinander an, wobei das Thermometer einfrieren kann, wenn die Temperatur nicht zu tief fällt. Aufhören muß man mit einem Schmelzpunkt und dann das Thermometer aus dem Tiegel herausziehen, damit es nicht bei dem Erkalten zerbricht.

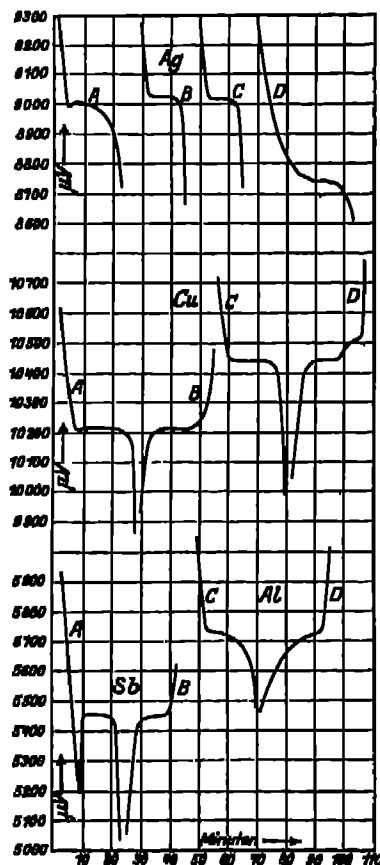
Fig. 97. Schmelz- und Erstarrungskurven.

Bei reinen Metallen stimmen Schmelz- und Erstarrungspunkt innerhalb der Meßgrenzen überein. Unreinheit erniedrigt die Kurven und rundet das geradlinige Stück ab. Wenn 100 g Metall m g Unreinheit vom Molekulargewicht M, also m/M Mole enthalten, so erhält man nach dem Raoult-van't Hoffschen Gesetz für die Schmelzpunkterniedrigung:

$$\Delta T = \frac{m}{M}\frac{RT^2}{100\,w} = 0{,}02\,\frac{m}{M}\,\frac{T^2}{w},$$

wo T die normale absolute Schmelztemperatur und w die Schmelzwärme bedeutet.

Während die meisten Oxyde der genannten Metalle in diesen am Schmelzpunkt unlöslich sind, ist das Kupferoxydul löslich und bildet mit dem flüssigen Metall ein eutechtisches Gemisch, das 3,45 % Cu_2O enthält und 20,0° tiefer schmilzt als das reine Metall. Auch auf den Schmelzpunkt des Silbers hat der Sauerstoff Einfluß; er wird von dem Metall gelöst und kann dessen Schmelzpunkt, wenn er bei dem Zutritt der Luft erfolgt, um mehrere Grade herabsetzen. Man muß deshalb das Metall in reduzierender Atmosphäre oder unter einer Kochsalzdecke schmelzen.

Fig. 97 zeigt verschiedene Schmelz- und Erstarrungskurven, die mit

nate aufgetragen ist, während die Abszissen die Beobachtungszeite darstellen. Die oberste Reihe bezieht sich auf Silber· Kurve A, die d Schmelzen an der Luft zeigt, weist keinen Haltepunkt auf, weil das Meta durch Sauerstoff verunreinigt ist; die Kurven B und C beziehen sich au das von der Luft abgeschlossene Silber, das eine Mal bei Verwendun eines Graphittiegels, das andere Mal eines Porzellantiegels mit Kochsal: decke. Die Kurve D ergab sich bei dem Einleiten von Sauerstoff i das geschmolzene Metall. Die zweite Reihe gilt für das eutechtiscl Gemisch von Kupfer und seinem Oxydul (A und B) und für das rei Metall (C und D); in beiden Fällen treten scharfe Schmelz- und E starrungspunkte auf. Ebenso in der dritten Reihe bei Antimon, wo i A die starke Unterkühlung charakteristisch ist, die Kurven C und beziehen sich auf Aluminium, dessen Unreinheit sich deutlich im Ve laufe durch das Fehlen des horizontalen Astes kundgibt.

Wegen des Einflusses des Sauerstoffs ist es auch nicht möglich, Silb ebenso wie Gold und die Platinmetalle in Form kurzer Drahtstücke die Lötstelle eines Thermoelements einzufügen und auf diese Weise d Schmelzpunkt zu bestimmen, wie bei den Temperaturmessungen a schwarzen Körper gezeigt wurde. Dieses Verfahren ist wegen sein Einfachheit und Sicherheit besonders für die Festlegung des Goldschmel punkts zweckmäßig und hat bewirkt, daß diese Temperatur zum Au gangspunkt der radiometrischen Skale gewählt wurde.

Graphittiegel können nicht zum Schmelzen von Nickel, Kobalt ur Eisen benutzt werden, weil diese Metalle Kohle aufnehmen; es komn hierfür Magnesia oder Tonerde zur Verwendung. Ebenso lassen sich nı wenige Salze in reduzierender Atmosphäre schmelzen, und Porzellan sow Schamotte werden von ihnen meistens stark angegriffen, so daß Tieg aus Nickel oder Platin notwendig sind. Dazu kommt, daß die Schmel wärme gering ist, so daß sich diese Schmelzpunkte nicht besonders zı Temperaturmessung eignen.

In tiefer Temperatur kommen außer dem Schmelzpunkt organisch Stoffe[1]) die Erstarrungspunkte der verflüssigten Gase in Betracht.] Leiden sind die folgenden Temperaturen nebst den zugehörigen Druck beobachtet:

	t	p (cm Hg)		t	p (cm H
Methan	— 183,15°	7,0	Sauerstoff	— 218,4°	—
Argon	— 189,30°	51,6	Neon	— 248,67°	32,35
Stickstoff	— 200,86°	9,64	Wasserstoff	— 259,14°	5,41

[1]) F. Henning, Ann. Phys. 43, 284. 1914; J. Timmermans, H. van der Hor

2. Gefrierpunktserniedrigung von Lösungen.

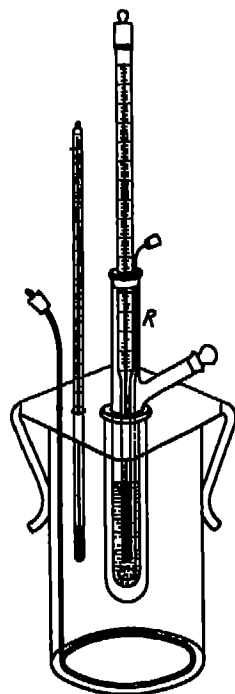
Es ist schon auf den Einfluß hingewiesen worden, welchen die Lösung fremder Bestandteile auf die Schmelztemperatur reiner Stoffe ausübt. Seit RAOULT (1878) erkannt hatte, daß die Gefrierpunktserniedrigung der Lösungen gegenüber dem Lösungsmittel ein einfaches Mittel zur Ermittlung des Molekulargewichts bildet, und VAN'T HOFF (1880) die Beziehung zwischen osmotischem Druck und Gefrierpunktserniedrigung nachwies und begründete, beschäftigen sich zahlreiche experimentelle Arbeiten mit der Bestimmung des Gefrierpunkts von Lösungen.

Werden in 1000 g Lösungsmittel s g eines Stoffes vom Molekulargewicht M gelöst, so wird der Gefrierpunkt der Lösung erniedrigt um $\Delta_s = Cs/M$, wo der Koeffizient C, unabhängig vom gelösten Stoff, für jedes Lösungsmittel eine Konstante ist, und zwar gilt, wenn T die absolute Schmelztemperatur, w die Schmelzwärme des Lösungsmittels bezeichnet: $C = 0{,}00198\ T^2/w$.

Streng gelten diese Formeln nur für sehr verdünnte Lösungen. Man beobachtet gewöhnlich mit konzentrierteren, und zwar mit verschiedenen, und extrapoliert alsdann auf große Verdünnung. Liegt Dissoziation vor, wie z. B. bei der Lösung von Elektrolyten in Wasser, ist also von n Molekülen die Zahl $n\alpha$ in je x Teile gespalten, so daß die gesamte Zahl $n\alpha x + n(1-\alpha)$ beträgt, so verhält sich das beobachtete Molekulargewicht M' zu dem wahren M wie diese Zahl zu n; also

$$\frac{M}{M'} = \frac{n(\alpha x + 1 - \alpha)}{n} \quad \text{oder} \quad \alpha = \frac{M - M'}{M'(x-1)}.$$

Fig. 98. Gefriergefäß.

Der Gefrierapparat, dessen Ausbildung man besonders BECKMANN verdankt, besteht aus einem Kühlgefäß, wozu ein Batterieglas genommen wird, welches mit einer Filzhülle zum Wärmeschutz umgeben und zweckmäßig mit einem Kryohydrat gefüllt wird, dessen eutechtisches Gemisch eine konstante Temperatur gewährleistet. Sie soll etwas unter dem Gefrierpunkt des Lösungsmittels liegen. In dieses Kältebad taucht, durch einen Luftmantel geschützt, das Gefrierrohr R (Fig. 98), ein großes Reagenzrohr mit seitlichem Ansatz, das die Lösung, das BECKMANNsche Thermometer und den Ringrührer enthält, den man entweder von Hand oder durch einen Elektromagnet auf- und abbewegt. Im letzten Falle

sich die Rührgeschwindigkeit einfach verstellen läßt. Man beobacht zuerst den Erstarrungspunkt des Lösungsmittels, den man durch Impfe mit einer Spur gefrorenen Lösungsmittels einleitet, die man mit eine Glasstift oder einer Glasperle durch den seitlichen Ansatz in das Gefrie rohr einführt. Dann gibt man nach vollständigem Auftauen den zu löse den festen Stoff in Pastillenform oder eine Flüssigkeit mit der Pipette hinz und bestimmt nochmals den Gefrierpunkt unter genau den gleichen B dingungen. In diesem Falle sinkt die Erstarrungstemperatur allmählic weil festes Lösungsmittel ausscheidet und infolge dessen die Konzentr tion zunimmt. Als Gefrierpunkt gilt deshalb der nach der Unterkühlu erreichte höchste Stand des Thermometers Unter Hinzufügung neue Stoffes wiederholt man die Bestimmung mehrfach, wobei man sich m einer Gefrierpunktserniedrigung von etwa 0,2° begnügt. Dazu reich 0,001—0,002 Mol auf 10 g Lösungsmittel hin.

Bei genauen Messungen wird etwa 0,5 l Lösung benutzt, womit e Vakuummantelgefäß gefüllt wird. Bei jeder Beobachtung eines E starrungspunktes entnimmt man dem Gefriergefäß einen Teil der Lösu und bestimmt ihren Gehalt durch Analyse[2]).

Für tiefe Temperaturen benutzt man Widerstandsthermometer u füllt das Kühlbad mit Petroläther, der durch flüssige Luft gekühlt wird Ebenso dient ein solches elektrisches Thermometer zu Beobachtung bei hoher Temperatur in geschmolzenen Metallen und Salzen[4]).

Vierzehntes Kapitel.

Sieden und Verdampfen.

1. Siedetemperatur und Sättigungsdruck.

Die Bestimmung des normalen Siedepunkts einer Flüssigkeit ist sch in der Thermometrie nach dem dynamischen und statischen Verfahr behandelt. Weicht der Druck im ersten Falle von demjenigen der Atm sphäre ab, so wird das Siedegefäß mit einer künstlichen Atmosphä verbunden, d. h. mit einem größeren Gasraum, dessen Druck belieb eingestellt werden kann. Durch einen Rückflußkühler gelangt der Dam in den Siedekessel zurück. Der Druck, welcher der Siedetemperat zugeordnet wird, ist unmittelbar an dem Thermometer zu messe

[2]) E. Beckmann, ZS. phys. Chem. 44, 170. 1903; W. Nernst u. R. Abe ebd. 15, 681. 1894; Abegg, Wied. Ann. 64, 486. 1898; W. Roth, ZS. ph Chem. 79, 100. 1912.

[4]) E. Beckmann, ZS. anorg. Chem. 74, 302. 1912.

Namentlich bei kleinen Drucken und starker Verdampfung treten selbst in kurzen, weiten Rohren merkliche Druckunterschiede auf[1]). Die Temperatur wird nicht in der Flüssigkeit, sondern im Dampf bestimmt, ausgenommen bei Lösungen, aus denen zwar der Dampf mit der Temperatur der Flüssigkeit entweicht, doch bald bei den gebräuchlichen Anordnungen auf diejenige des siedenden Lösungsmittels sinkt[2]).

Der Druck des Dampfes, der Sättigungsdruck, als Funktion der Siedetemperatur aufgetragen, liefert die Sättigungskurve, welche die Grenze zwischen dem Dampf- und dem Flüssigkeitszustande bildet; sie beginnt mit der kritischen Temperatur, oberhalb welcher der Flüssigkeitszustand aufhört, und nähert sich bei tiefer Temperatur asymptotisch der Abszissenachse. Die Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur wird dargestellt durch Gleichungen von der Form:

$$\log p = a - \frac{b}{T} - c\,T + 1{,}75 \log T \text{ [3]) und } \log p = A + \frac{B}{T} + C\,T \text{ [4]).}$$

Er ist in weiten Grenzen für viele Stoffe untersucht. Als Beispiel kann das Wasser dienen, das von $-60°$ bis $+374°$, der kritischen Temperatur, gemessen worden ist[5]). In diesem Bereiche, wo der Sättigungsdruck von $1 \cdot 10^{-5}$ auf 218 Atm. steigt, hat je nach der Größe des Drucks das Beobachtungsverfahren gewechselt: oberhalb 200° wurde statisch mit der Druckwage beobachtet, dann bis +50 herunter dynamisch mit dem gewöhnlichen Quecksilbermanometer, unterhalb +50° wieder statisch zuerst mit einem geheizten Manometer und weiter abwärts mit dem Kippmanometer. S. WEBER[6]) hat die Versuche unterhalb 0° mit dem KNUDSENschen Manometer wiederholt und bis −100° fortgesetzt. Unter 0° reichen die Beobachtungen für die flüssige Phase nur bis −15°, während sich die lange Reihe auf den Sättigungsdruck über Eis bezieht.

Sättigungsdrucke, wie sie bei Wasser in tiefer Temperatur noch durch Druckmessung bestimmt wurden, kann man nach KNUDSEN[7]) aus der Masse m ermitteln, die in der Zeit τ bei stationärer molekularer Strömung des Dampfes im Vakuum durch die enge Öffnung in der dünnen Wand einer Röhre gelangt. Hierfür gilt $m = \sqrt{s_1}\,\frac{p_1 - p_2}{W_1 + W_2}\,\tau$, wo s_1 das spezifische Gewicht des Dampfes bei dem Druck von 1 Dyn/cm², ,

[1]) O. v. REICHENBERG, ZS. phys. Chem. 95, 184. 1920.

[2]) Versuche über diese Erscheinung s. bei K. SCHREBER, ZS. techn. Phys. 1923, 19 und bei O. KNOBLAUCH u. H. REIHER, ebd. 1923, 432.

[3]) W. NERNST, Grundlagen des neuen Wärmesatzes. 1918.

[4]) R. PLANCK, ZS. techn. Phys. 1921, 1.

[5]) Wärmetabellen der P.-T. Reichsanstalt 1919.

[6]) S. WEBER, Comm. Leiden Nr. 150a. 1915.

p_1 und p_2 die Drucke zu beiden Seiten der Öffnung, W_2 den Widerstan der Öffnung und W_1 den der Röhre bedeuten. In Fig. 99 stellt die Röhre dar, ihr Fortsatz B mit Teilung ist auskalibriert und dient zu Messung der von E übergehenden Quecksilbermenge, die bei C durch ei etwa 0,05 cm² weites Loch einer 0,2 mm dicken Glaswand geht, wenn ei Temperaturunterschied zwischen B und E besteht. Dazu dienen zwe Temperaturbäder: in das kältere wird die Röhre A von oben hineinge steckt, während sich das zweite in dem den oberen Teil C umgebende Behälter F befindet. Wurde dieser auf 0° gehalten, während A durc Kohlensäureschnee auf —80° abgekühlt war, so ging in 13 Tagen etw

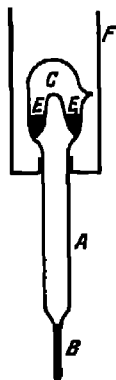
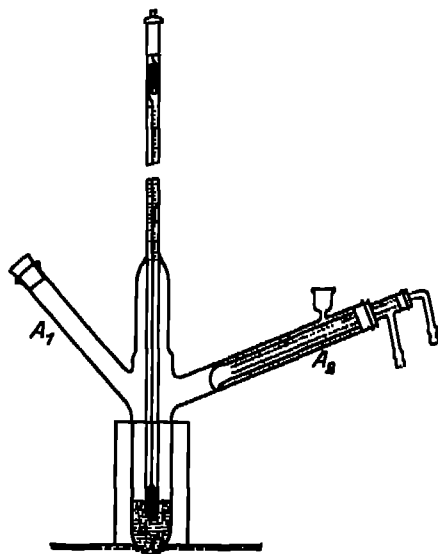



Fig. 99. Molekulare Strömung. Fig. 100. Siedegefäß.

0,5 g Quecksilber durch das Loch nach B, woraus sich der Sättigungs druck p_1 bei 0° zu 0,000 185 mm Quecksilber ergab, wenn p_2 bei —80° als verschwindend klein angenommen wurde. Indem B auf 0° blieb wurde die Temperatur von E bis 50° variiert. Die Ergebnisse ließen sich durch die Gleichung $\log p = 10{,}5724 - 0{,}847 \log T - 3342{,}20/T$ gut darstellen.

Das Verfahren ist nicht anwendbar auf die Verdampfung fester Metalle wofür LANGMUIR[8]) die Abhängigkeit des Sättigungsdrucks von der Tempe ratur bestimmt hat Es wurde die Gewichtsabnahme der im Vakuum glühenden Drähte von Wolfram, Molybdän und Platin gemessen und daraus der Sättigungsdruck berechnet unter der Annahme, daß für

die Verdampfungsgeschwindigkeit nicht der Durchgang durch eine enge Öffnung, sondern durch die Oberfläche des Metalles selbst maßgebend sei. Von einer Reflexion der Dampfmoleküle wird dabei abgesehen.

Den Eintritt des Siedens der schweren Metalle beobachtete Greenwood (1912) im elektrischen Ofen aus der Bewegung der Oberfläche größerer Mengen, die im Tiegel erhitzt wurden, und Ruff[9]) aus der Zunahme der Verdampfung des Tiegelinhalts mit einer Federwage. Den Sättigungsdruck bestimmte v. Wartenberg (1913) aus der Dampfmenge, welche ein indifferentes Gas beim Hinüberleiten über das erhitzte Metall aufnimmt. Nach dem Daltonschen Gesetz ist sie ebenso groß wie in einem Vakuum von gleichem Volumen und gleicher Temperatur.

2. Siedepunktserhöhung von Lösungen.

Der Sättigungsdruck einer siedenden Flüssigkeit wird durch Lösung eines Stoffes, der nicht an der Verdampfung teilnimmt, herabgesetzt, und zwar ist die molekulare Erniedrigung des Sättigungsdrucks ebenso wie des Gefrierpunkts unabhängig von der Natur des gelösten Stoffes (Raoult, Ostwald). Doch hat sich ein praktisches Verfahren, die Erniedrigung des Sättigungsdrucks zu bestimmen, bisher wegen der vielfachen Fehlerquellen nicht durchgesetzt. Man beobachtet vielmehr zur Bestimmung des Molekulargewichts die Erhöhung Δ_s des Siedepunkts, welche durch die Lösung des zu untersuchenden Stoffes auftritt. Werden in 1000 g Lösungsmittel s g eines Stoffes vom Molekulargewicht M gelöst, so wird der Siedepunkt der Lösung erhöht um $\Delta_s = C\frac{s}{M} = \frac{0{,}00198\,T^2}{r}\cdot\frac{s}{M}$, wo r die Verdampfungswärme des Lösungsmittels bedeutet.

Um dieses zum Sieden zu bringen, heizte Beckmann (1889) das Siedegefäß direkt mit einem Bunsenbrenner, wobei es mit einem Luft- oder Dampfmantel umgeben war. Später diente auch ein in das Siedegefäß eingeschmolzener Platindraht zur elektrischen Heizung. Das 2,5 cm weite und 20 cm hohe zylindrische Siedegefäß besitzt zwei seitliche Ansätze: durch den einen A_1 (Fig. 100) wird der zu lösende Stoff eingebracht, der andere A_2 enthält den Rückflußkühler und eine Öffnung für den Druckausgleich. Von oben ist das Thermometer in das Siederohr eingeführt, das auf einem Drahtnetz über der Flamme steht, deren Gase durch eine ausgeschnittene Asbestplatte von der Seitenfläche abgehalten werden. Zum Ausgleich der Temperatur von Dampf und Flüssigkeit wird in diese eine Schicht Platintetraeder, Tariergranaten oder Glasperlen

gebracht. Die Siedetemperatur stellt sich in etwa 10—15 Minuten e
wonach der zu lösende Stoff meist als Pastille eingeführt und die Sie
temperatur von neuem bestimmt wird. Durch weiteres Zugeben v
Pastillen kann eine längere Beobachtungsreihe ausgeführt werd
Statt mit einem Luftmantel, der einfach aus einem Glaszylinder beste
kann man das Siederohr auch mit einem Dampfmantel umgeben, ein
ringförmigen Hohlkörper aus Glas oder Porzellan, in welchem man
Lösungsmittel zum Sieden bringt und es mit einem ähnlichen Rückfl
kühler, wie ihn das Siederohr aufweist, wieder verdichtet.

Einfacher ist das Verfahren, das Siederohr mit strömendem Dampf
heizen (LANDSBERGER 1898). Der in einer Kochflasche K (Fig. 1

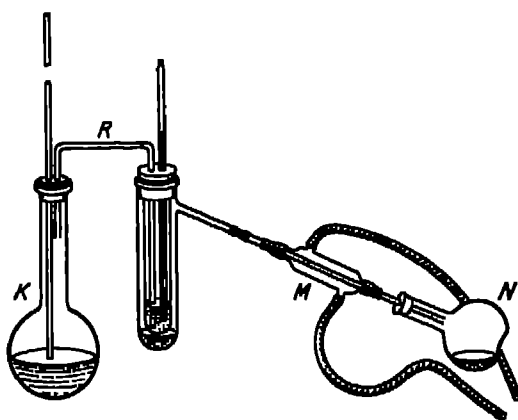



Fig. 101. Siedegefäß mit strömendem Dampf. Fig. 102. Siedegefä

erzeugte Dampf des Lösungsmittels wird durch das doppelt gebog
Rohr R fast auf den Boden des Siederohrs geleitet, tritt durch eine Ö
nung am oberen Rande alsdann in den Mantel und zuletzt durch d
Kühler M in eine Vorlage N, wo das Kondensat gesammelt wird. Nach
die Flüssigkeit im Siederohr das Gefäß des Thermometers bedeckt, w
dieses abgelesen. Darauf entleert man den Apparat und setzt ihn v
neuem an, nachdem der zu lösende Stoff eingeschüttet ist. Es folgt
Bestimmung der Siedetemperatur der Lösung in derselben Weise und
Wägung des Siederohrs. Das Ergebnis, vermindert um das Gewicht
leeren Siederohrs und des eingeführten Stoffes, liefert das Gewi
des Lösungsmittels. Besitzt das Siederohr eine Teilung nach Volum
an welcher der Stand der Flüssigkeit abgelesen werden kann,
lassen sich mehrere Messungen hintereinander ausführen, wobei
Menge des Lösungsmittels wächst und die des gelösten Sto

Wird durch die Lösung von N′ Molen eines Stoffes in N Molen eines Mittels dessen Sättigungsdruck p auf p′ erniedrigt, so ist nach RAOULT: $\frac{p - p'}{p} = \frac{N'}{N} = \frac{m'}{M'} \cdot \frac{M}{v\,s}$, wenn m′ g eines Stoffes vom Molekulargewicht M′ mit einem Lösungsmittel vom Molekulargewicht M zu einer Lösung vom Volumen v und der Dichte s vereinigt sind.

Zur Beobachtung der Dampfdruckerniedrigung hat MENZIES[10]) den folgenden Apparat angegeben. In den Hals eines Kolbens A (Fig. 102), in dem das Lösungsmittel zum Sieden gebracht wird, läßt sich mittels eines Schliffes S ein Rohr einsetzen, das eine Teilung nach Kubikzentimeter und ein Manometerrohr mit Millimeterteilung besitzt. Durch das Rohr strömt der Dampf in einen Rückflußkühler, von wo das Kondensat auf dem Wege in den Siedekolben zurückgelangt.

Anfangs sind sowohl der Kolben als auch der Einsatz mit dem Lösungsmittel etwa zu zwei Drittel gefüllt. Nun wird der Ausgang zum Kühler mit einem Quetschhahn gesperrt, alle Luft durch Dampf ausgetrieben, der durch die Öffnung des Einsatzes entweicht. Diese wird durch den Glasstöpsel geschlossen, der Weg zum Kühler wieder geöffnet, sobald sich die Temperatur durchweg ausgeglichen hat. Nach einiger Zeit ruhigen Siedens liest man den Standunterschied der Flüssigkeiten in dem weiten Kolben und dem engen Manometerrohr ab, der durch die Kapillarität verursacht wird. Nun wird der zu lösende Stoff in gewogener Menge eingebracht und die Beobachtung wiederholt. Der neue Höhenunterschied der Kuppen, korrigiert wegen der vorher bestimmten Wirkung der Kapillarität, gibt die Dampfdruckerniedrigung in Lösungssäule h. Ist b der Barometerstand während des Siedens, so folgt:

$$\frac{p - p'}{p} = \frac{h\,s}{13{,}6\,b} \text{ und } M' = \frac{13{,}6\,b\,m'\,M}{h\,s^2\,v}.$$

3. Hygrometrie.

Die Flüssigkeiten verdampfen ebenso in gasgefüllten Räumen wie im Vakuum. In beiden Fällen beobachtet man den gleichen Sättigungsdruck, der nur von der Temperatur abhängt. Besonders das Bedürfnis der Meteorologie, den Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre zu kennen, hat zu der Entwicklung der hygrometrischen Verfahren geführt, die auch für die technischen Trockenanlagen von Bedeutung geworden sind.

Drückt man den Feuchtigkeitsgehalt der Luft in g/m³ aus, d. h. 1 m³ Luft enthält g Gramm Wasserdampf, so wird er als absolute Feuchtigkeit f bezeichnet im Gegensatz zur relativen, welche das Verhältnis von f zu derjenigen Menge f_0 darstellt, welche die Luft bei derselben Tempe-

ratur enthielte, wenn sie mit Feuchtigkeit gesättigt wäre. Zu f ur
mögen p und p_0 als Dunstdruck gehören, wo p_0 (in Millimeter Qu
silber) einer Tabelle des Sättigungsdruckes zu entnehmen ist. Ferne

$$f = \frac{1,293 \cdot 0,622}{1 + 0,00367\,t} \frac{p}{760} 10^3 = \frac{1,058\,p}{1 + 0,00367\,t} \text{g/cm}^3$$

Die sicherste Methode zur Bestimmung von f besteht darin, ein a
messenes Luftvolumen durch eine Absorptionsröhre zu leiten, wo es se
Wassergehalt an Chlorcalcium, Schwefelsäure oder Phosphorpent
abgibt. Man bestimmt ihn aus der Gewichtszunahme der Röhre. S
Umständlichkeit halber wird das Verfahren nur benutzt, um an
Hygrometer zu eichen.

Das älteste rührt von DANIELL (1820) her. Es besteht aus zwei (
kugeln, die durch eine doppelt gebogene Röhre verbunden sind. Die l
mit einer ringförmigen Vergoldung enthält außer einem Thermom
etwa zur Hälfte Äther, die rechte ist mit Mull umwickelt. Benetzt
diesen mit Äther, durch dessen Verdunstung sich die Kugel abk
so destilliert der Äther im Innern des evakuierten Apparates von
nach rechts über. Infolgedessen kühlt sich auch die Kugel links ab
sinkt auf die Temperatur θ, bei welcher der vorhandene Feuchtigk
gehalt f dem Sättigungszustande entspricht, was daran erkannt
daß sich die Kugel mit Wasser beschlägt Die Tabelle der Sättig
drucke liefert den zu θ gehörigen Dampfdruck p. Es empfiehlt sich
Taupunkt θ auch von der andern Seite einzustellen, das Verschwi
des Niederschlags bei der Erwärmung der Kugel zu beobachten un
Mittel zu nehmen. Wegen der Abkühlung der Luft an der Kugel is
Ergebnis für p zu groß und mit $(273 + \theta)/(273 + t)$ zu multipliz

REGNAULT bewirkte die Abkühlung des Äthers durch einen Lufts
dessen Stärke er durch einen Aspirator so regelte, daß der Niederse
eben auftrat oder verschwand.

Ein anderes Mittel zur Bestimmung der Feuchtigkeit in der A
sphäre bildet das Psychrometer von AUGUST (1825). Es besteht aus
nebeneinander aufgehängten Thermometern, von denen das eine troc
die Temperatur der Luft mißt, während das andere, dessen Gefäß
benetztem Mull umwickelt und ständig feucht gehalten wird, im
meinen infolge der Verdunstungskälte tiefer zeigt. Denn zur Verdamp
des Wassers, mit dem sich die an das nasse Thermometer herankomm
Luft sättigt, wird dieser Wärme entzogen. Bezeichnet p den D
druck bei der Temperatur t, die das trockene Thermometer an
und sei t′ die des feuchten Thermometers und der zu dieser Tem
tur gehörige Sättigungsdruck p'_0, so gilt: $p = p'_0 - c \cdot (t - t')$.

Thermometer gesättigt wird. Hängen die Thermometer in dem Luftstrome von Trockenkammern, so kann man diesen in solcher Stärke aufrechterhalten, daß volle Sättigung an dem feuchten Thermometer erreicht wird. Weniger gleichmäßig sind die natürlichen Luftbewegungen der Atmosphäre, weshalb man bei meteorologischen Messungen das Aspirationspsychrometer (ASSMANN 1887) benutzt. Die Thermometergefäße sind hier in einem vernickelten doppelten Blechmantel untergebracht, durch den man mit einem kleinen, von einem Uhrwerk angetriebenen Ventilator Luft saugen kann. Die Instrumente sind auf diese Weise sowohl vor Strahlung geschützt, als auch einem kräftigen Luftstrom ausgesetzt Unter diesen Bedingungen kann man nach Versuchen von SPRUNG[11]) zwischen 7° und +20° für c den Wert 0,50 annehmen. Bei ruhiger Luft, namentlich in abgeschlossenen Räumen, gilt ein größerer Wert.

Für das Psychrometer benutzt man gewöhnlich Quecksilberthermometer. In Trockenanlagen, für welche vielfach das Bedürfnis der Fernübertragung besteht, kommen jedoch auch Widerstandsthermometer oder Thermoelemente zur Anwendung.

Zur Messung der relativen Feuchtigkeit dienen seit H. B. DE SAUSSURE (1783) die Haarhygrometer, deren Einstellung auf der Ausdehnung beruht, die ein entfettetes Menschenhaar unter dem Einfluß der Feuchtigkeit erfährt. Sie geben eine Genauigkeit von etwa 5% und bedürfen häufig der Vergleichung mit dem Psychrometer. Einfach ist die Prüfung des 100-Punktes, wozu man das Instrument neben Wasser unter einer Glasglocke beobachtet. Andere Punkte der Teilung stellte REGNAULT (1845) durch Schwefelsäurelösungen her, über denen der Sättigungsdruck von 100 bis 2% abfällt, wenn der Gehalt von 0 auf 80% steigt. Konzentrierte Salzlösungen dienen demselben Zweck[12]). Zu starke Austrocknung vertragen die Haarhygrometer nicht.

4. Kritischer Zustand.

Erhitzt man eine Flüssigkeit in einem geschlossenen Rohr über ihren Siedepunkt hinaus, so ist der Druck zunächst unabhängig von der Menge: er bewegt sich auf der Sättigungslinie. Ist wenig Flüssigkeit vorhanden und ist sie vollständig verdampft, so entfernt sich bei weiter steigender Temperatur der Druck von der Sättigungslinie nach unten. Ist die Menge der Flüssigkeit jedoch größer, so kann sich infolge ihrer Ausdehnung das Dampfvolumen verkleinern, ja die Flüssigkeit nimmt das Gefäß vollständig ein, und der Druck entfernt sich nun von der Sättigungslinie

[11]) C. SPRUNG, Das Wetter 1888, 105.
[12]) R. KEMPF. ZS f Instr 1917 193

nach oben In beiden Fällen wird der Eintritt der kritischen Erscheinung nicht beobachtet. Nach der Theorie wäre hierfür eine bestimmte Menge des Stoffes in dem Rohre nötig, nämlich eine solche, deren Volumen dem kritischen entspricht. Tatsächlich kann das Volumen von dem kritischen jedoch erheblich abweichen, da die Dichte der Stoffe am kritischen Punkt so stark von Temperatur und Druck abhängt, daß sie selbst in kleinen Gefäßen große Unterschiede aufweisen kann. So kann schon die Schwere bewirken, daß der kritische Zustand in einer gewissen Höhe des Rohrs besteht, während oberhalb die Dichte kleiner, unterhalb größer ist. Variiert man die Stoffmenge in diesen mittleren Grenzen, so wird eine Verzweigung der Sättigungskurve beobachtet, die fast von einem Punkte auszugehen scheint Die obere Grenze dieser fächerartigen Ausbreitung der Kurve wird der kritischen Temperatur nahekommen. Eine große Genauigkeit ist allerdings hierbei nicht zu erreichen, weil sich die Strahlen des Büschels unter sehr spitzem Winkel schneiden.

Auf diese Weise haben CAILLETET und COLLARDEAU (1891) die kritische Temperatur und den kritischen Druck des Wassers bestimmt Diese Flüssigkeit wurde in wechselnder Menge in einem eisernen Gefäß bei konstantem Volumen erhitzt; sie war durch Quecksilber abgeschlossen, dessen Stand mittels eines elektrischen Kontakts durch eine Druckpumpe festgehalten wurde, deren Wirkung an einem Gasmanometer abzulesen war

Genauer ist es, die kritischen Daten aus der Messung der Isothermen abzuleiten. Hat man ein System dieser Kurven festgelegt, so ist diejenige Kurve auszusuchen, bei welcher, wenn v als Abszisse und p als Ordinate aufgetragen ist, das der v-Achse parallele Kurvenstück, das der Sättigungskurve entspricht, verschwunden ist. Werden die Isothermen in hinreichend kleinen Temperaturintervallen aufgenommen, so läßt sich die kritische Temperatur auf diese Weise genau bestimmen: in hoher Temperatur sind Wasser, Äther, Alkohol usw. so beobachtet worden[13]), in tiefer Temperatur z. B. Sauerstoff, Argon, Stickstoff, Neon, Wasserstoff und Helium[14]).

Mit dem Sättigungsdruck steigt mit wachsender Temperatur t die Dichte B C des Dampfes (Fig. 103), während diejenige A C der Flüssigkeit infolge der Ausdehnung abnimmt, so daß sich die Dichten der beiden Phasen immer näher kommen, bis sie im kritischen Punkt K ineinander übergehen. Als Funktion der Temperatur aufgetragen, liegen die Dichten

---

[13]) A. BATELLI, Mem. R. Acc. Torino (2) 40. 1889; Ann. chim. phys. (6) 25, 38; 26, 394, (7) 3, 408. 1892 u. 1894; L. HOLBORN u. A. BAUMANN, Ann. Phys. 31, 965. 1910.

auf einer parabelähnlichen Kurve, deren gerade Mittellinie MK schwach gegen die t-Achse geneigt ist (CAILLETET und MATHIAS 1886). Sind die Dichten von Flüssigkeit und Dampf bis nahe an die kritische Temperatur O H gemessen, so kann man den mittleren Teil der Parabel graphisch ergänzen, natürlich um so sicherer, je näher man der kritischen Temperatur gekommen ist. Kennt man diese schon anderweitig, so läßt sich auch durch Verlängerung „des geraden Durchmessers" M M' bis zum Schnitt mit der Ordinate im kritischen Punkt die kritische Dichte finden. Allerdings ist der Durchmesser bei manchen Stoffen etwas gekrümmt. Der kritische Druck wird durch Extrapolation einer der angegebenen Formeln aus dem gemessenen Sättigungsdruck abgeleitet (S. 178).

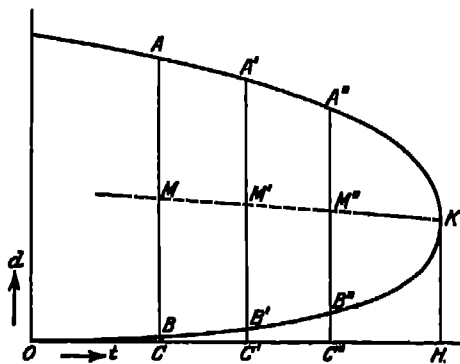



Fig. 103. Gerader Durchmesser.

Fig. 104. Dilatometer.

Um die Dichten verflüssigter Gase und ihrer Dämpfe bei tiefen Temperaturen zu bestimmen, benutzten KAMERLINGH ONNES und MATHIAS[15]) ein Dilatometer von 1 bis 2 cm^3 Inhalt (Fig. 104), das einerseits in einen 10 cm langen und 0,3 cm weiten, geteilten Hals, andererseits in einen kurzen, ebenfalls geteilten Ansatz ausläuft; an den Hals setzt sich eine enge Kapillare, an die ein dünnes Metallrohr angeschlossen wird, das die Verbindung über einen Hahn einerseits mit dem Gasbehälter, andererseits mit dem Volumeter vermittelt. Nachdem das Dilatometer genau kalibriert ist, wird es an den Apparat angeschlossen und im Kältebade bei einer bestimmten Temperatur mit Gas gefüllt, das sich zu Flüssigkeit verdichtet. Man liest den Stand der Kuppe im Halse ab und läßt dann den Inhalt bis auf einen Tropfen im Ansatz in das Volumeter verdampfen, wo das Volumen des Gases bei Zimmertemperatur und Atmosphärendruck gemessen wird. Darauf werden der im Dilatometer zurückge-

[15]) H. KAMERLINGH ONNES u. E. MATHIAS, Comm. Leiden Nr. 117. 1911. S. auch die Zusammenstellung von MATHIAS in der Denkschrift für KAMERLINGH

bliebene Dampf und der Flüssigkeitsrest ins evakuierte Volumeter übe geführt, so daß beide Dichten, sowohl die der Flüssigkeit wie die ihr gesättigten Dampfes, berechnet werden können

Durch diese Versuche und solche nach der Isothermenmethode sind Leiden die folgenden kritischen Daten von Gasen gemessen worden·

	T_k	p_k (Atm.)	d_k
Sauerstoff	154,3°	49,71	0,430
Argon	150,6₅	48,00	0,531
Stickstoff	126,0	33,40	0,311
Neon	44,7	26,86	—
Wasserstoff	33,2	12,80	0,031
Helium	5,25	2,26	0,066.

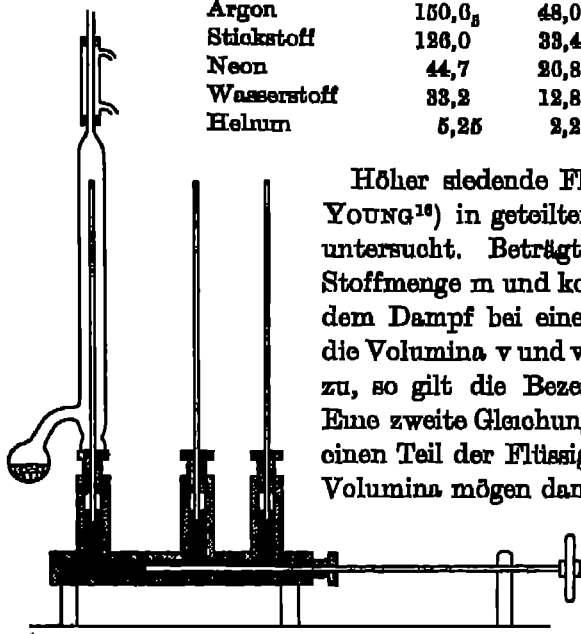



Fig. 105. Druckbehälter.

Höher siedende Flüssigkeiten hat besonde YOUNG[16]) in geteilten und kalibrierten Röhre untersucht. Beträgt das Gewicht der ganze Stoffmenge m und kommen der Flüssigkeit un dem Dampf bei einer bestimmten Temperatu die Volumina v und v′ und die Dichten d und d zu, so gilt die Bezeichung: $v\,d + v'\,d' = m$ Eine zweite Gleichung wird erhalten, wenn ma einen Teil der Flüssigkeit verdampfen läßt: d Volumina mögen dann in v_1 und v_1' übergehe usw., so daß sich d „orthobaren" Dichten be rechnen lassen.

Für die Untersuchun dient ein von RAMSAY un YOUNG[17]) angegebene Apparat (Fig. 105). Er besteht aus einem starken, 1 cm weiten eiserne Rohr, das mit Ansätzen zur Aufnahme der Versuchsröhren versehen is Das eine Ende ist verschlossen, an dem andern wird ein durch ein Schraube zu bewegender Stempel eingeführt, mit dem der Druck zu nächst auf Quecksilber und dann auf den Röhreninhalt ausgeübt werde kann. Über die Herstellung der Verbindungen und ihre Abdichtun wird auf das Arbeiten mit hohen Drucken verwiesen. Gewöhnlich be schickt man nur eine der 1,5 mm weiten Kapillaren mit Flüssigke und heizt sie durch ein Dampfbad, die beiden andern Röhren dienen a Gasmanometer und sind von Flüssigkeitsbädern umgeben.

[16]) S. YOUNG, ZS. phys. Chem. 29, 193. 1899 (Isopentan); Proc. R. Soc. Dubli 12, 374. 1910.

Ein Nachteil des Verfahrens ist das geringe Volumen der Versuchsröhren, wodurch sich bei Beobachtung der Dichte des gesättigten Dampfes Oberflächenwirkungen bemerkbar machen. Bei Messungen der Dichte des gesättigten Wasserdampfes, die im Münchner Laboratorium für technische Physik zwischen 100° und 190° angestellt wurden[18]), wurden deshalb Kolben aus Jenaer Geräteglas von 2 bis 3 l Inhalt benutzt, welche nach dem Vorgang von FAIRBAIRN und TATE auch außen vom Dampf umgeben und dadurch vom inneren Überdruck entlastet waren. Das Gefäß, das eine abgewogene Menge Wasser enthielt, wurde zunächst so hoch erhitzt, bis der ganze Inhalt verdampft und die Temperatur über den Sättigungspunkt gestiegen war. Es wurde dann allmählich mit der Temperatur und dem Druck heruntergegangen, wobei schrittweise Punkte der Isochoren, der Kurven gleichen Volumens, festgelegt wurden. In dem sonst geradlinigen Verlauf dieser Kurven, deren Schnittpunkt mit der Sättigungslinie die Temperatur liefert, wo das im Glaskolben befindliche Dampfvolumen die Sättigungsgrenze erreicht, machten sich auch selbst bei einem so großen Gefäß an dieser Grenze noch schwache Unregelmäßigkeiten bemerkbar, welche auf Oberflächenwirkung zurückzuführen sind.

Der Schwierigkeit, welche die Messung der Dichte gesättigter Dämpfe bietet, wird man überhoben, wenn sowohl die Verdampfungswärme r des Stoffes als auch der Sättigungsdruck p in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur bekannt sind. Dann läßt sich der Unterschied des spezifischen Volumens des Dampfes v_s und der Flüssigkeit v_s' nach der CLAUSIUS-CLAPEYRONschen Gleichung $r = AT\frac{dp}{dt}(v_s - v_s')$ berechnen, wo A das mechanische Wärmeäquivalent ($4{,}186_8 \cdot 10^7$ Erg/cal = 426,90 mkg*/kcal) bedeutet.

Nach den behandelten Verfahren wird der Eintritt des kritischen Zustandes immer nur mehr oder weniger indirekt bestimmt. Zur unmittelbaren Beobachtung dient das Verschwinden und Auftreten des Meniskus, der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Dampf (CAGNIARD DE LA TOUR 1822). Hierzu dienen beiderseits zugeschmolzene starkwandige Glasröhren von etwa 4 bis 10 mm Weite, die mit der richtigen Menge des Versuchsstoffs gefüllt sind (NATTERER 1844), d. h. Menge geteilt durch Volumen muß der kritischen Dichte ziemlich nahekommen, die etwa das Dreifache von der bei Zimmertemperatur beträgt. Bei der Herstellung füllt man zweckmäßig mehrere Röhren, deren Inhalt um kleine Beträge verschieden gewählt werden. Besondere Sorgfalt ist auf

[18]) O. KNOBLAUCH, R. LINDE u. H. KLEBE, Forschungsarbeiten Ver. d. Ing.

die Reinigung des Stoffes zu verwenden, da die kritischen Erscheinung schon durch geringe Spuren fremder Beimengungen stark geände werden. Ferner ist bei der Erwärmung der Röhren die größte Aufmer samkeit auf die Gleichmäßigkeit der Temperatur zu richten · eine schlech Temperaturverteilung ruft bei der großen Ausdehnung der Stoffe a kritischen Punkt starke Dichtenunterschiede hervor. Man prüft d Dichte an verschiedenen Stellen der geschlossenen Röhre durch GILBER FARADAYsche gläserne hohle Perlen von etwa 2 mm Durchmesser, c als Schwimmer von wechselnder Dichte verwandt werden[19]), und benut zum Ausgleich einen elektromagnetischen Rührer, wenn das Drehen od Kippen der Röhre nicht ausreicht. Als Beispiel einer genauen H stellung des kritischen Zustandes sei die Untersuchung von KAMERLIN ONNES und FABIUS[20]) an der Kohlensäure angeführt.

NADESCHDIN (1887) beobachtete die Gleichmäßigkeit der Dichte Rohr mit der Wage Es diente hier gleichsam als Balken, der zuerst l in einer Vorrichtung auf einer Schneide ins Gleichgewicht gebrac wird. Darauf gefüllt, befindet er sich im labilen Gleichgewicht, da Flüssigkeit bei dem leisesten Anstoß nach unten fließt. Auf die kritisc Temperatur erwärmt, kehrt der Balken in die stabile Gleichgewichtsla zurück Das Verfahren ist besonders für undurchsichtige Röhren geeign

Statt geschlossener Röhren kann man auch offene verwenden, die m mit Quecksilber abschließt ähnlich den früher erwähnten, worin Dichten von Flüssigkeit und Dampf gemessen wurden. ALTSCHUL bestimmte den kritischen Druck solcher Röhren unmittelbar mit d Manometer. Zunächst wird ein Druck eingestellt, der etwas niedri ist als der zu erwartende, dann wird die Röhre erwärmt, bis sich in Mitte eine Dampfsäule bildet, die beiderseits von Flüssigkeit begren wird. Bei weiterer Erwärmung und Steigerung des Drucks gelingt die Menisken zum Verschwinden zu bringen.

Wenn man sich der Temperatur nähert, wo der Meniskus verschwind trübt sich der Inhalt der Röhre. Er schillert in der Aufsicht bläuli in der Durchsicht braun bis zur Undurchsichtigkeit. Am kritisch Punkt selbst wird die Röhre milchigweiß. Daß diese kritische Opalesz nicht von Unreinigkeiten stammt, sondern auf dem molekularen Gef der Stoffe im kritischen Zustande beruht, hat v. SMOLUCHOWSKI[22]) d getan, und KEESOM[23]) hat bewiesen, daß nach der Theorie die Trübu

[19]) G. TEICHNER, Ann. Phys. 13, 595. 1904.

[20]) H. KAMERLINGH ONNES u. G. H. FABIUS, Comm. Leiden Nr. 98, 1907

[21]) M. ALTSCHUL, ZS. phys. Chem. 11, 577. 1893.

[22]) M. v. SMOLUCHOWSKI, Ann. Phys. 25, 205. 1908.

in demselben Maße zunimmt, wie sich die Temperatur der kritischen nähert. Darauf wurde ein Verfahren zur genauen Messung der kritischen Temperatur gegründet, indem man die Lichtabsorption photometrisch ermittelt oder die Trübung der Versuchsröhre mit einer Skale von Milch-Wassergemischen vergleicht, wobei sich die Röhre horizontal anordnen und damit die Wirkung der Schwere auf die Ausbildung von Dichteunterschieden eliminieren läßt.

Fünfzehntes Kapitel.

Wärmeleitvermögen.

1. Allgemeines.

Die Einheit des Wärmeleitvermögens λ besitzt ein Körper, wenn durch 1 cm^2 seines Querschnitts bei einem Temperaturgefälle von 1° in 1 Sekunde 1 Kalorie fließt. Die Dimension ist cal $\cdot$ cm^{-1} $\cdot$ Grad^{-1} $\cdot$ s^{-1} = 4,184 Watt $\cdot$ cm^{-1} $\cdot$ Grad^{-1}. Der technischen Einheit liegen Kilokalorie, Meter und Stunde zugrunde, so daß 360 CGS = kcal $\cdot$ m^{-1} $\cdot$ Grad^{-1} $\cdot$ h^{-1}. λ dividiert durch das Produkt von Dichte und spezifischer Wärme heißt Temperaturleitvermögen λ/cs; es sei mit a cm^2 $\cdot$ s^{-1} bezeichnet

Genaue Messungen des Wärmeleitvermögens sind schwierig. Da es keine vollkommenen Isolatoren für Wärme gibt, hat man stets den Wärmeaustausch mit der Umgebung zu berücksichtigen. Man setzt dafür gewöhnlich das Newtonsche Abkühlungsgesetz voraus, wonach die von einem Körper an das umgebende Mittel übertragene Wärme der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des Körpers und dem Mittel proportional ist, wobei es gleichgültig ist, ob dieser Austausch durch Leitung, Strahlung oder Konvektion vor sich geht. Hat man es wie bei den meisten Meßanordnungen mit einem linearen Verlauf des Wärmestroms zu tun — er verlaufe in der x-Achse, θ sei die Temperatur im Körper, θ_0 die der Umgebung, t die Zeit und h eine Konstante, — so ist

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - h(\theta - \theta_0).$$

Die Ergebnisse der Messungen sind in hoher Temperatur noch unsicher und einander widersprechend. Zwischen 0° und 100° ändert sich das Wärmeleitvermögen der reinen Metalle, das durch das Gefüge und durch Verunreinigungen stark beeinflußt wird, wenig; es steigt von hier wahrscheinlich nach hohen Temperaturen schwach, nach tiefen stark an und wird mit Annäherung an den absoluten Nullpunkt unendlich groß. Was das Verhältnis zum elektrischen Leitvermögen $\varkappa$ betrifft, so ist

LORENZ), nimmt aber unterhalb 0° ab und verschwindet am absoluten Nullpunkt. Selbst bei den Metallen, die elektrische Supraleitung aufweisen, ändert sich λ in tiefer Temperatur nicht in solchem Maße. Auch bei Legierungen nimmt λ in tiefer Temperatur zu, ebenso im Gegensatz zu den reinen Metallen $\lambda/(\varkappa\, T)$. Die thermische Leitfähigkeit der Metalle liegt bei 20° etwa zwischen 1 für Silber und 0,05 $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ für Neusilber, das letztere übertrifft Isolatoren wie Glas und Porzellan immerhin noch um das 20fache.

Über das Leitvermögen der Flüssigkeiten, deren Untersuchung durch die Konvektion erschwert wird, ist unsere Kenntnis noch lückenhafter. Die Frage, ob es mit der Temperatur zu- oder abnimmt, läßt sich nur für wenige Stoffe mit Sicherheit beantworten.

Die geringe Leitfähigkeit der Gase ist bis zu einem Drucke von wenigen Millimeter Quecksilber abwärts vom Druck unabhängig und nimmt mit der Temperatur stark zu.

2. Stationäre Wärmeströmung.

Für eine Reihe von Meßverfahren stellt man eine stationäre Wärmeströmung her, es entspricht dies der Bedingung $\partial\theta/\partial t = 0$. Zuerst untersuchte PÉCLET (1841) den Wärmedurchgang durch Platten, die er auf beiden Seiten mit Wasser bespülte. der oberen Seite führte er heißes Wasser zu, welches an die Platte Wärme abgab, die hindurchging und das Spülwasser an der unteren Seite erwärmte. Sind θ_1 und θ_2 die Temperaturen der beiden Flächen, l die Dicke der Platte, so geht in der Zeit t durch den Querschnitt F die Wärmemenge $Q = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{l} F t$, die durch die Temperaturen und die Menge des Spülwassers gemessen wurde. Die Wärmeableitung an den Rändern der Platte war wegen deren geringer Dicke zu vernachlässigen. Das Verfahren krankte daran, daß die Temperaturen θ_1 und θ_2 im Wasser gemessen wurden und wegen des Übergangswiderstandes zwischen Wasser und Platte selbst bei einer schnellen Bewegung des Wassers nicht die wahre Temperatur der Platte darstellen. An dieser haftet immer eine Wasserschicht, deren Dicke wohl durch kräftiges Rühren vermindert, aber nicht ganz beseitigt werden kann und wegen ihrer schlechten Leitfähigkeit von großem Einfluß auf den Wärmedurchgang ist. Es ist deshalb nötig, die Temperatur θ_1 und θ_2 an der Platte selbst zu messen, was seit LANGBERG (1845) meistens mit Thermoelementen geschieht, deren Drähte etwa 0,1 bis 0,2 mm stark gewählt werden, damit sie die Temperatur der Meßstelle wenig beeinflussen. Man führt die Elemente zweckmäßig in enge Bohrungen

erfahren, daß man die zugeführte Wärme elektrisch erzeugt und die Leistung aus Spannung und Stärke des Heizstromes bestimmt, so daß

$$\lambda = \frac{E\,I\,l}{F(\theta_1 - \theta_2)} \quad \text{(Lees 1898)}$$

Fig. 106 stellt eine Versuchsanordnung dar, wie sie EUCKEN[1]) verwendet hat. Der Heizkörper q besteht aus einer Kupferplatte, die auf ihrem Umfange Windungen aus isoliertem, in Lack eingebettetem Konstantandraht trägt und unter Zwischenlage einer Glimmerplatte durch die Stahlfeder f und die Stahldrähte d d auf den Probekörper b gepreßt wird,

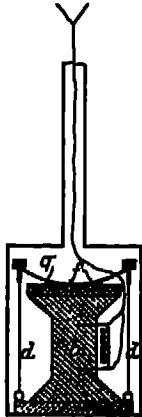



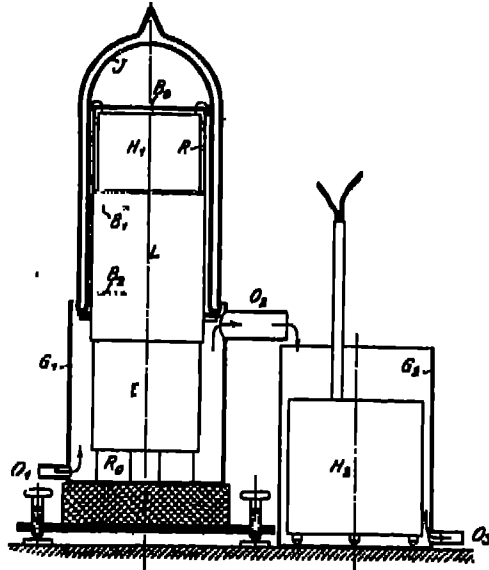
Fig. 106. Stationärer Wärmestrom. Fig. 107. Stationärer Wärmestrom.

der seinerseits auf einer schlecht leitenden Bodenplatte ruht. Die Temperatur wird an zwei Stellen gemessen, wo Thermoelemente, sicher isoliert, in Bohrungen eingefügt sind. Das Ganze befindet sich in einem verlöteten Kasten, aus dem die elektrischen Leitungen durch ein Rohr herausführen, so daß man den Apparat mit verschiedenen Gasen füllen und in Bäder eintauchen kann.

Fig. 107 gibt die von JAKOB[2]) getroffene Anordnung wieder. Hier ist der Versuchskörper L ein Metallzylinder von 15 cm Höhe und 12 cm Durchmesser, auf dessen oberer Fläche der elektrische Heizkörper H_1 gesetzt ist, der aus einem mit Öl gefüllten geschlossenen Kupfergefäß besteht, in welches Spulen aus Konstantandraht eintauchen. Die Thermo-

[1]) A. EUCKEN, Ann. Phys. 34, 185. 1911.

elemente aus 0,2 mm dickem Eisen- und Konstantandraht stecken i
den engen Bohrungen B_1 und B_2 und berühren nur mit der nackten Lö
stelle unmittelbar den Körper L, der sich nach unten in einen Eisenklotz
fortsetzt, aus welchem die Wärme durch Kühlwasser aus der Wasse
leitung fortgeführt wird. Dieses fließt durch O_1 dem Gefäß G_1 z
und durch O_2 ab und kann im Gefäß G_2 durch den Heizkörper I
erwärmt und nach G_1 zurückgepumpt werden, wenn bei höherer Tem
peratur beobachtet werden soll. Um die Wärmeverluste herabzu
drücken, ist über den oberen Teil ein versilbertes Vakuummante
gefäß J gestülpt.

Bei einem andern Apparat geht die Wärme ebenfalls von dem elek
trischen Heizkörper H aus, in dessen starken Wänden verschiedene Therm
elemente zur Prüfung der Temperaturverteilung untergebracht sin
V stellt den Versuchszylinde
dar, der hier aus schlecht leiten
dem Stoff angenommen und de
halb kurz gehalten ist. K ist d
Kühlkörper, aus dem die Wärm
durch Wasser abgeführt wir
Die Wärmeverluste werden ve
mieden einmal an der Seite dur
einen Schutzring R (BERGE
1887) und oben durch de
Deckel D, welche beide elektris
durch besondere Spulen auf d
Temperatur der Hauptwicklun
H gebracht werden. Der ganze Apparat ist in ein schlecht leitend
Pulver, z. B. grobes Korkschrot eingebettet, nachdem die Heizkörp
erst einzeln gut durch Asbest isoliert sind. Der Dauerzustand wi
nach einer Heizung von 3 bis 4 Stunden erreicht (Fig. 108).

Fig 108. Stationärer Wärmestrom.

Vielfach besteht das Bedürfnis, harte und spröde Stoffe zu untersuche
in welche sich Nuten für Thermoelemente in der gewünschten Län
nicht einbohren lassen. Handelt es sich z. B. um Stoffe wie Glas od
Porzellan, so führt man die Thermoelemente radial in zwei Kupfe
platten ein, zwischen welche die Versuchsplatte eingeschoben wird. U
die für den Wärmeübergang störende Luftschicht zwischen Versuchsplat
und Kupferplatte zu entfernen, bringt man einen Tropfen Öl dazwische
der gleichmäßig über die ganze Fläche verrieben wird. Die Dicke dies
Schicht, welche bei der Berechnung des Wärmewiderstandes berüc
sichtigt wird, ergibt sich aus dem Gewicht des Tropfens. Unbrauchb

Hier stellt man die Verbindung zwischen den Platten durch etwas heißes Paraffin her, das nach der Verteilung sogleich erstarrt.

Auch Flüssigkeiten, z. B. Wasser, lassen sich mit der Anordnung (Fig. 107) untersuchen. Zwischen Kupferplatten, die durch drei kleine Glasplättchen etwa 2 mm weit auseinandergehalten werden, bringt man eine kapillare Schicht Flüssigkeit, deren geringe Dicke die Konvektion hindert; es wird ein Temperaturgefälle von etwa 6° erzeugt und durch Thermoelemente gemessen, welche in die Platten eingeführt sind. Zwischen 7° und 72° fand JAKOB[3]) für Wasser:

$$\lambda = 0{,}001\,325\,(1 + 0{,}002\,984\,\theta)\ \mathrm{CGS}.$$

Ferner ist in ähnlicher Weise oft das Wärmeleitvermögen von Isolierstoffen gemessen[4]). Für diese kommen Probeplatten von größeren Abmessungen, etwa 50 × 50 cm, in Betracht, da es sich meist um Erzeugnisse von nicht großer Gleichmäßigkeit handelt. Ein Schutzring erweist sich natürlich um so notwendiger, je dicker die zu untersuchenden Platten sind. Oft untersucht man von diesen ein Paar, so daß die Heizplatte auf jeder Seite mit einer Versuchsplatte bedeckt ist und auf jede die Hälfte der entwickelten Wärme entfällt, wenn darauf geachtet wird, daß das Kühlwasser auf beiden Seiten mit gleicher Temperatur abfließt. Für die Untersuchung solcher Stoffe von schlechter Wärmeleitung erweist sich auch die Kugelform zweckmäßig, wo bei der Heizung vom Mittelpunkt aus keine Wärmeverluste auftreten. Bequem ist das Verfahren[5]) z. B. für Pulver, die man in eine Kupferkugel vom Radius r_1 einführt, in deren Mittelpunkt sich eine elektrisch geheizte kleinere vom Radius r_2 befindet. Sind die Temperaturen auf den entsprechenden Oberflächen θ_1 und θ_2, die in der Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge Q, so kommt: $\lambda = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2 (\theta_1 - \theta_2)}$ CGS. Mit der Kugelform läßt sich das Verfahren des stationären Wärmeflusses auf hohe Temperaturen anwenden, wo wegen der Strahlung die Schwierigkeiten wachsen.

Für Metalle wendet SCHOFIELD die Stabform bis 700° an; er heizt von der Mitte aus und verhindert den Verlust nach der Seite durch eine konzentrische Spule[6]).

Isolierstoffe werden bei praktischer Verwendung vielfach zum Wärmeschutz von heißen Rohrleitungen benutzt. Es liegt deshalb nahe, die Kugel mit dem Zylinder für die Bestimmung des Wärmeleitvermögens

---

[3]) M. JAKOB, Ann. Phys. 63, 537. 1920; ZS. V. d. Ing. 66, 688. 1922.

[4]) H. GRÖBER, Forschungsarbeiten Heft 104. 1911 und R. POENSGEN, ebd. Heft 130. 1912.

[5]) W. NUSSELT, ebd. Heft 63 u. 64, 1908.

zu vertauschen. Wird auf der Länge l die Wärmemenge Q an die Isoli schicht von den Radien r_1 und r_2 vom inneren Zylinder abgegeben, so bei hinreichender Länge des Probekörpers. $\lambda = \frac{Q}{2\pi(\theta_1 - \theta_2)} \ln$ wenn an der inneren und äußeren Oberfläche die Temperaturen θ_1 und im Dauerzustande beobachtet werden. Den Einfluß der Zylinderend kann man durch Schutzringe aufheben.

Nach dem ältesten Verfahren zur Messung des Leitvermögens (Di PRETZ 1822, FORBES 1852, G WIEDEMANN u FRANZ 1853) werden beiden Enden eines Stabes in einer Umgebung von gleichmäßiger Tem ratur θ_0 auf von θ_0 verschiedener Temperatur gehalten. Für d Dauerzustand ergibt die angeführte Differentialgleichung als Lösu $\theta = C e^{x\sqrt{\frac{h}{a}}} + C' e^{-x\sqrt{\frac{h}{a}}}$. Man mißt in drei Querschnitten, welche je die Strecke l voneinander entfernt sind, die Unterschiede der Tempe tur gegen θ_0; sie seien θ_1, θ_2 und θ_3. Dann ist $l^2 h/a = (\ln(n + \sqrt{n^2 - 1})$ wo $n = \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_3)/\theta_2$ ist. Stellt man dieselbe Messung un gleichen Bedingungen mit einem zweiten Stabe an, so kann man l eliminieren und erhält a und damit λ. Erforderlich ist die gleiche Ob flächenbeschaffenheit beider Stäbe, die man durch Vernickeln, Lackier usw. herstellt, damit der Wärmeaustausch jedesmal in gleicher We erfolgt. Günstig ist es, beide Enden auf gleiche Temperatur zu bring weil dann nur kleine Temperaturunterschiede im Stabe auftreten u die Abhängigkeit von der Temperatur weder für die innere noch für äußere Wärmeleitung eine Rolle spielt.

Erwärmt man einen Stab durchweg auf dieselbe Temperatur, so $\partial^2\theta/\partial x^2 = 0$, und für die Abkühlung erhält man: $\theta = C'' e^{-ht}$. I äußere Temperaturleitvermögen h ergibt sich aus Beobachtung nach der Zeit und damit auch absolut das Temperaturleitvermögen In die Bestimmung von λ geht hierbei die spezifische Wärme ein, wodur sich die besondere Messung einer Wärmemenge erübrigt

Das Verfahren beruht also auf der äußeren Wärmeleitung, die si wenn wie gewöhnlich die Versuche in der Atmosphäre angestellt werd aus Strahlung, Leitung und Konvektion zusammensetzt. Nach LORE ist die Summe von Leitung und Konvektion proportional $(\theta - \theta_0)$ während die Strahlung nach dem STEFAN-BOLTZMANNschen Ges proportional $(T_4 - T_0^4)$ ist.

3. Elektrisch geheizter Stab.

Statt dem Versuchskörper die Wärme von außen zuzuführen, kann m sie in seinem Innern durch Stromdurchgang erzeugen. Im stationär

nur durch die Elektroden austritt, allein von dem Verhältnis des thermischen und des elektrischen Leitvermögens ab (F. KOHLRAUSCH 1899) Dieser Satz gilt für Leiter von beliebiger Gestalt. Wir beschränken uns indessen auf den meist für die Messung benutzten Fall, daß es sich um einen Zylinder handelt, dessen Enden auf konstanter Temperatur und konstantem Potential gehalten werden, die Wärme soll nur parallel der Zylinderachse strömen, die mit der x-Koordinate zusammenfalle, von der allein das Potential v und die Temperatur θ abhängen Für den stationären Zustand gelten dann die beiden Differentialgleichungen $\varkappa\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \frac{\partial\left(\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)}{\partial x} = 0$ und $\varkappa\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial\varkappa}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial x} = 0$. In der ersten Gleichung stellt das erste Glied, mit dx dy dz multipliziert, die im Raumelement erzeugte, das zweite Glied in ähnlicher Weise die zugeführte Wärme dar. Die zweite Differentialgleichung folgt aus der Kontinuität des elektrischen Stromes i: da $\frac{\partial i}{\partial x} = 0$ und $-i = \varkappa\frac{\partial v}{\partial x}$, so ist $-\frac{\partial i}{\partial x} = \varkappa\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial\varkappa}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial x}$. Wir setzen einen homogenen Leiter voraus, so daß die Leitvermögen $\varkappa$ und λ nur von der Temperatur abhängen, und zwar sei. $\frac{\partial\varkappa}{\partial\theta} = \varkappa'$ und $\frac{\partial\lambda}{\partial\theta} = \lambda'$ Dann geht die zweite Differentialgleichung über in $\varkappa\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \varkappa'\frac{\partial\theta}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial x} = \varkappa\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \varkappa'\frac{d\theta}{dv}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 = 0$, da $\frac{\partial\theta}{dx} = \frac{d\theta}{dv}\frac{\partial v}{\partial x}$ und $\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = \frac{d^2\theta}{dv^2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \frac{d\theta}{dv}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$. Ferner erhält man: $\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) = \lambda\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \lambda'\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 = \left\{\lambda\frac{d^2\theta}{dv^2} + \lambda'\left(\frac{d\theta}{dv}\right)^2\right\}\left(\frac{dv}{dx}\right)^2 + \lambda\frac{d\theta}{dv}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$, so daß die erste Differentialgleichung übergeht in.

$$\frac{\varkappa}{\lambda} + \frac{d^2\theta}{dv^2} + \left(\frac{\lambda'}{\lambda} - \frac{\varkappa'}{\varkappa}\right)\left(\frac{d\theta}{dv}\right)^2 = 0.$$

Das Integral dieser Gleichung ist: $\int\frac{\lambda}{\varkappa}\,d\theta = C + C'v - \frac{1}{2}v^2$ und für den Fall, daß $\lambda/\varkappa$ in dem betrachteten Temperaturintervall als konstant angenommen werden kann: $\theta\lambda/\varkappa = C + C'v - \frac{1}{2}v^2$. Die Integrationskonstanten C und C′ werden dadurch bestimmt, daß an drei Punkten die Werte von θ und v gemessen werden; woraus folgt: $\frac{\lambda}{\varkappa} = \frac{1}{2}\frac{(v_1 - v_2)(v_2 - v_3)(v_3 - v_1)}{\text{[illegible]}}$. Sind die drei Punkte

voneinander gleich weit um l entfernt und sind die Temperaturen θ_1 un θ_3 der äußeren Punkte einander nahe gleich — ihr Mittel $\frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_3)$ s $= \theta'$ —, so ist $v_2 = \frac{1}{2}(v_1 + v_3)$ und $\lambda/\varkappa = \frac{1}{8}\frac{(v_1 - v_3)^2}{\theta_2 - \theta'}$.

$\lambda/\varkappa$ ändert sich so langsam mit der Temperatur, daß man für ein b stimmtes Intervall mit einem Mittelwert auskommen kann. Die Größe der Gleichung sind in CGS-Einheiten zu messen, wird v in Volt und in $\mathrm{Ohm^{-1}\,cm^{-1}}$ ausgedrückt, so ist das Ergebnis mit 10^7 zu mult plizieren, damit λ auf $\mathrm{Watt \cdot cm^{-1} \cdot Grad^{-1}}$ bezogen ist; Multiplikatic mit 0,239 gibt $\mathrm{cal \cdot cm^{-1} \cdot Grad^{-1}}$.

Jaeger und Diesselhorst[7]) haben das Verfahren auf die Messur zahlreicher Metalle bei 20° und bei 100° angewandt. Sie benutzten zylü drische Stäbe von 1 bis 2 cm Durchmesser, die in Abständen von 9 c. je drei Löcher von $1/_2$ mm Durchmesser erhielten, in welche die Therm elemente zur Messung der Temperatur eingeführt waren. Gleichzeit wurden mit diesen Drähten unter Stromwendung die Spannung abg nommen, so daß $\varkappa$ aus Querschnitt q, Strom i und Spannung $v_1 -$ nach der Formel $\varkappa = 2\,l\,i / q(v_1 - v_3)$ und damit auch λ bestimn werden konnte. Es kamen Temperaturdifferenzen von nur wenige Graden zur Anwendung. Die Enden der Stäbe standen in inniger Ve bindung mit Bädern und wurden dadurch auf konstanter Temperat gehalten, während die Seitenfläche gegen Wärmeabgabe durch e Wattepolster geschützt war. Durch dieses Mittel wurde die Strahlu und Konvektion vermieden und die äußere Wärmeleitung verringe Ihr Einfluß war bei der Anordnung in weiten Grenzen dem Temperatu überschuß $\theta_2 - \theta_0$ des Stabes proportional und wurde berücksichtig Liegt die Außentemperatur θ_0 um $1/_6(\theta_2 - \theta')$ unterhalb θ_2, so ü die äußere Wärmeleitung keine Wirkung aus. Diese Bedingung li sich angenähert immer einhalten, da als Temperatur der Umgebu die eines temperierbaren doppelten Kupfermantels in Betracht ka Zur Erwärmung der dicken Stäbe waren Stromstärken bis 400 notwendig.

Auf dieselbe Weise hat Hornbeck[8]) Alkalimetalle und ihre Legi rungen untersucht. Zur Messung in tiefer Temperatur, wo kleinere Stä anzuwenden sind, hat Diesselhorst (1902) eine Abänderung des Ve fahrens vorgeschlagen, die Meissner[9]) bis zu Temperaturen des flüssig Wasserstoffs benutzt hat. Bei zwei Stärken des Heizstromes werden d Widerstände R_1 und R_2 sowie die Spannungen E_1 und E_2 zwischen zw

[7]) W. Jaeger u. H. Diesselhorst, Wiss. Abhandl. der P.-T. R. III, 269. 190

[8]) J. W. Hornbeck, Phys. Rev. 2, 217. 1913.

auf konstanter Temperatur T gehaltenen Punkten des Probestäbchens, ferner der Temperaturkoeffizient $\alpha = 1/R \cdot dR/dT$ gemessen. Dann gilt in erster Annäherung: $\frac{\lambda}{\varkappa} = \frac{\alpha}{12}\left\{E_2^2 + \frac{R_1(E_2^2 - E_1^2)}{R_2 - R_1}\right\}$.

Das Versuchsstäbchen von 7 cm Länge und 1 mm Durchmesser ist durch Kupferscheibchen mit den Stromzuführungen verbunden und von einem 0,1 mm dicken Konstantanrohr umgeben, in dem durch eine dünne Zuleitung das Vakuum hergestellt werden kann, damit man von der äußeren Wärmeleitung unabhängig wird. Das Konstantanrohr, das einen Nebenschluß zum Versuchsstäbchen bildet, besitzt diesem gegenüber einen so großen Widerstand, daß es von dem 200 A starken Heizstrom nur einen geringen Teil aufnimmt. Durch besondere Potentialdrähte werden die Spannungen E, E′ und E″ an den Enden des Versuchsstäbchens einer Strecke des Konstantanrohrs von bekanntem Widerstande R′ und eines in den Stromkreis eingeschalteten Normalwiderstandes R″ gemessen, und es ist $R = E/(E''/R'' - E'/R')$. Die ganze Anordnung hängt an den Stromzuleitungen in einem Bade flüssigen Sauerstoffs oder Wasserstoffs oder in Petroleum (20°) oder Paraffinöl (100°), dessen Temperatur mit einem Platinwiderstandsthermometer bestimmt wird. Dieses dient auch dazu, $1/R \cdot dR/dT$ in Abhängigkeit von der Temperatur in einer besonderen Versuchsreihe zu ermitteln.

Knudsen sowie S. Weber[10]) haben ebenfalls die Bestimmung des Wärmeleitvermögens eines stromdurchflossenen Leiters untersucht. Letzterer kommt für den Fall, daß von der äußeren Wärmeleitung abgesehen werden kann, zu der Formel: $\frac{\lambda}{\varkappa_0} = \frac{I^2 R^2}{12\,\theta}\left(1 - \frac{4}{5}\,\alpha\,\theta\right)$, wo I die Stromstärke, R den Widerstand, α dessen Temperaturkoeffizienten und θ die mittlere Temperatur des Leiters über die Umgebung bedeuten und $\varkappa_0$ sich auf das Ende des Leiters bezieht. Ähnlich verfährt Langmuir[11]) bei der Untersuchung eines im Vakuum glühenden Drahtes, wo natürlich die starke Strahlung berücksichtigt werden muß.

Angell[12]) hat die Wärmeleitung eines Hohlzylinders, der durch einen starken Strom zum Glühen gebracht worden ist, in anderer Weise gemessen. Er wählt das Probestück so lang, daß es in der Mitte auf einer Strecke gleichmäßig erhitzt und die Wärme hier fast vollständig nach außen abgegeben wird, so daß die nach den Seiten in der Zylinderachse fließende vernachlässigt werden kann. Die Bohrung sei an dieser Stelle nur eng und habe den Radius r_2, der äußere Zylindermantel den Radius

---

10) Sophus Weber, Ann. Phys. 54, 165. 1917.

11) J. Langmuir, Phys. Rev. 7, 151. 1916.

r_1, die entsprechenden Temperaturen seien θ_2 und θ_1, E der Spa nnungsabfall auf der Längeneinheit, J die Stromdichte. Dann $\lambda = \frac{E\,J}{2(\theta_2 - \theta_1)}\left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{2} - r_2^2 \ln\frac{r_1}{r_2}\right)$. Bei guten Leitern ist offenb nur in hoher Temperatur ein genügendes Temperaturgefälle zwisch Achse und Mantel des Zylinders herzustellen. Für diesen Bereich ist d Verfahren auch deshalb vorteilhaft, weil es auf der nach außen abg gebenen Wärme beruht, die infolge der Strahlung groß ist. Die Te peraturen θ_1 und θ_2 werden mit Thermoelementen gemessen.

4. Veränderlicher Wärmezustand.

In der Absicht, die Ergebnisse von den Schwankungen der äußer Wärmeleitung unabhängig zu machen, haben viele Beobachter statt c stationären einen veränderlichen Wärmezustand des Versuchskörp benutzt und alsdann die Temperaturverteilung in ihrer Abhängigk von der Zeit gemessen. Von diesen Verfahren, deren theoretische I gründung meistens eigenartig ist, hat vielleicht gerade deshalb kein eine allgemeinere Anwendung gefunden im Gegensatz zu der Entwicklu anderer physikalischer Meßmethoden, wo sich mit der Zeit das eine oc andere Verfahren als das für den Gebrauch zweckmäßigste hera bildet. Außerdem sind neuerdings die Anwendungen des stationär Zustandes mehr in den Vordergrund gerückt, so daß die Messung mit veränderlicher Temperaturverteilung kürzer behandelt werd können[19]).

Angström (1862) erwärmt und kühlt periodisch einen Stab an eine Ende ($x = 0$) bei der Außentemperatur 0 und beobachtet an zwei Stell (x und $x + l$) den Temperaturverlauf mit der Zeit. Dann gi

$$\theta(x) = \sum_{n=0}^{n=\infty} A_n \cos\left(\frac{2\,n\,\pi\,t}{T} + B_n\right) \text{ und}$$

$$\theta(x + l) = \sum_{n=0}^{n=\infty} A'_n \cos\left(\frac{2\,n\,\pi\,t}{T} + B'_n\right),$$

wo T die Periode der Erwärmung und wenn, wie früher, a das innere un das äußere Temperaturleitvermögen, $\frac{A_n}{A'_n} = e^{\alpha_n l}$; $B_n - B'_n = \beta_n l$;

$$\alpha_n \beta_n = \frac{n\,\pi}{a\,T}; \quad \alpha_n^2 - \beta_n^2 = \frac{h}{a}.$$

H. Weber hat nach einem Vorschlage von F. Neumann beide Ste enden erwärmt und abgekühlt, und letzterer bestimmt noch die Temp ratur an zwei Punkten eines Stabes, welcher der Abkühlung überlas

[19]) Vgl. E. W. Hobson und H. Diesselhorst, Wärmeleitung in d. Enzy

wird, nachdem er vorher in einem Querschnitt erwärmt worden ist. Dieses Verfahren ist auch auf den Ring ausgedehnt und auf diese Gestalt von H. F. WEBER angewandt.

KIRCHHOFF und HANSEMANN (1879) brachten an einer Grenzfläche eines Würfels von 14 cm Kantenlänge, der sich auf der Temperatur der Umgebung befand, eine plötzliche Temperaturänderung hervor und verfolgten den Temperaturverlauf mit Thermoelementen und Chronographen an mehreren Stellen des Körpers, die auf einer Mittellinie lagen, welche auf jener Grenzfläche senkrecht steht. Die Temperatur der übrigen Seitenflächen ubte nur eine geringe Wirkung auf den Wärmefluß aus, die sich genau genug aus Näherungswerten für die innere und äußere Leitfähigkeit berechnen ließ. Damit ist die Aufgabe zurückgeführt auf die lineare Wärmebewegung in einem unendlich ausgedehnten Leiter, dessen Temperatur mit Ausnahme einer einzelnen Ebene überall Null ist. Diesen Fall haben FOURIER und LAPLACE mathematisch behandelt.

L. LORENZ[14]) beobachtete den Verlauf der Temperatur in Stäben, auf denen er Thermoelemente in $(n + 1)$ Punkten im Abstande l voneinander verteilte In denjenigen Teil des Stabes, der zwischen den Schnitten $x = \frac{1}{2} l$ und $x = (n - \frac{1}{2}) l$ liegt, tritt in der Zeiteinheit auf der einen Seite die Wärmemenge $\lambda q (\theta_0 - \theta_1)/l$ ein, auf der anderen Seite dagegen die Wärmemenge $\lambda q (\theta_{(n-1)l} - \theta_{nl})/l$ aus, wo q den Querschnitt des Stabes bedeutet. Wird demnach $\theta_0 - \theta_l - \theta_{(n-1)l} + \theta_{nl} = \Delta$ gesetzt, so ist $\lambda q \Delta/l$ die Wärmemenge, welche jener Stabteil aufnimmt und welche teils zur Erwärmung verbraucht, teils abgeleitet wird.

Die betrachtete Länge $(n - 1) l$ kann man sich in $(n - 1)$ gleiche Teile zerlegt denken; jeder davon gebraucht zu seiner Erwärmung um 1° $c \cdot s \cdot q \cdot l$ cal, wenn c die Wärmekapazität und s die Dichte bezeichnet. Da die Temperatur jedes Teils in der Sekunde um $d\theta_l/dt$, $d\theta_{2l}/dt$, ... $d\theta_{(n-1)l}/dt$ steigt, so sind hierzu für $(n-1)$ Teile csql $(d\Sigma/dt)$ cal nötig, wo $\Sigma = \theta_l + \theta_{2l} + \ldots \theta_{(n-1)l}$. Ist die Temperatur des Stabes nicht sehr ungleichmäßig, so kann die an die Umgebung abgegebene Wärmemenge als Funktion der mittleren Temperatur $\Sigma/(n-1)$ betrachtet werden, und man erhält $\frac{\lambda q}{l} \Delta = csql \frac{d\Sigma}{dt} + f(\Sigma)$. Nun erwärmt man zunächst den Stab von einem Ende aus und hört dann damit auf, so daß anfangs Σ zunimmt und dann die früheren Werte rückwärts durchläuft, während Δ nach der Erwärmung den kleinen Wert Δ' annimmt. Für die letztere Beobachtungszeit gilt die Gleichung:

$$\frac{\lambda q}{l} \Delta' = csql \frac{d\Sigma'}{dt} + f(\Sigma').$$

Daraus folgt für $\Sigma = \Sigma' \frac{\lambda q}{l}(\Delta - \Delta') = c s q l \left(\frac{d\Sigma}{dt} - \frac{d\Sigma'}{dt}\right)$, wo $d\Sigma/dt$ positiv, $d\Sigma'/dt$ negativ ist.

Hieraus läßt sich λ berechnen. Σ und Δ werden durch passende Verbindung der Thermoelemente unmittelbar gemessen, wobei die Erwärmung so durchgeführt wird, das Δ konstant bleibt. Der Stab befindet sich in einem doppelwandigen Zylinder, dessen Temperatur entweder durch einen Wasserstrom auf Zimmertemperatur oder durch Dampf auf 100° gehalten wird. Die Messungen, welche noch nach dem Verfahren von FORBES kontrolliert wurden, ergaben, daß für jede der beiden Beobachtungstemperaturen das Gesetz von WIEDEMANN und FRANZ gilt, $\lambda/\varkappa$ also konstant ist, daß sich jedoch $\lambda/\varkappa$ mit der Temperatur in der Weise ändert, daß $\lambda/(\varkappa T)$ für alle Metalle konstant bleibt.

Die Kristalle der nichtregulären Systeme besitzen eine Wärmeleitfähigkeit, die von der Richtung abhängt. Führt man also einer solchen dünnen Kristallplatte von der Mitte aus, z. B. durch einen elektrisch geheizten Draht, der durch ein Loch hindurchgesteckt wird, Wärme zu, so bilden die Isothermen Ellipsen, deren Hauptachse sich wie die Quadratwurzeln aus den dieser Richtung entsprechenden Hauptleitfähigkeiten verhalten. SÉNARMONT (1847) stellte diese Ellipsen durch Schmelzkurven dar, indem er die Platte vor dem Erwärmen mit einem Gemisch von Wachs und Terpentin überzog, das beim Abkühlen einen Rand hinterläßt. Deutlicher wird noch das Bild, wenn man nach VOIGT (1897) der Schmelzmasse Elaidinsäure zusetzt, die einen schärferen Schmelzpunkt besitzt. RÖNTGEN (1874) hauchte die Platte einfach an; der Beschlag verdampfte alsdann bei der Erwärmung in Ellipsen, welche durch Lykopodiumpulver herausgehoben werden, das an der feuchten Fläche haftet Nach diesem Schmelzverfahren hat VOIGT auch die Leitfähigkeit isotroper Stoffe verglichen. Zwei Platten aus verschiedenem Stoff von der Gestalt eines rechtwinkligen Dreiecks werden an den Hypothenusen A C durch Kitt oder Lot aneinandergesetzt, worauf in die vereinigten Platten durch Anlegen der Kante A B an einen warmen Leiter, z. B. einen amalgamierten Kupferklotz, ein Wärmestrom erzeugt wird. Die Winkel φ_1 und φ_2 der Isothermen mit der Hypotenuse werden aus den Schmelzkurven entnommen und das Verhältnis der Leitfähigkeiten nach der Gleichung: $\frac{\varkappa_1}{\varkappa_2} = \frac{tg\,\varphi_1}{tg\,\varphi_2}$ berechnet. Die Winkel lassen sich bequem mit einem NÖRREMBERGschen Polarisationsapparat messen, dessen

Fig. 109. Isothermen als Schmelzkurven.

Wärmeleitvermögen λ reiner Metalle bei t°.

	−252°	−190°	0°	100°	300°	500°
Aluminium . . .	—	0,45	0,40	0,53	0,54	—
Antimon	—	0,10	0,054	0,052	—	—
Blei	0,12	0,089	0,084	0,084	—	—
Cadmium . .	0,44	0,25	0,22	0,21	—	—
Flußeisen	—	0,11	0,12	—	—	—
Gold	3,6	0,78	0,74	0,74	—	—
Kupfer . .	4,5	1,15	0,95	0,93	0,89	0,86
Magnesium . . .	—	—	—	0,34	0,32	0,34
Nickel	—	0,13	0,14	0,15	0,13	0,13
Platin	0,93	0,18	0,17	0,17	—	—
Quecksilber	—	0,12	0,020	—	—	—
Silber	—	—	1,00	0,99	—	—
Wismut	—	0,060	0,010	0,016	—	—
Zink	—	0,28	0,265	0,26	0,24	—
Zinn	—	—	0,15	0,14	—	—

5. Gase.

Die Wärmeleitung von Flüssigkeiten und Gasen ist vielfach nach dem Verfahren der stationären Strömung bestimmt worden. Besonders über die Gase liegen viele Versuche vor, die durch die Beziehung angeregt wurden, welche die kinetische Gastheorie zwischen Wärmeleitung und Zähigkeit η der Gase gefolgert hat. Hiernach ist $\lambda = f\,\eta\,c_v$, wo c_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen bezeichnet und f einen Koeffizienten, der nach der Theorie (Chapman 1911) und Beobachtung gleich 2,5 zu setzen ist. Als Versuchsanordnung (Christiansen 1881) dient eine Säule von Kupferplatten, zwischen denen sich in kleinen Zwischenräumen die Flüssigkeit befindet, ähnlich wie es früher (S. 189) für die Untersuchung des Wassers schon angegeben ist. Hierbei ist der Einfluß der Strömung wohl ziemlich ausgeschaltet. Nach einem zweiten Verfahren (Schleiermacher 1888) erhitzt man elektrisch einen Draht mit großem Widerstandskoeffizienten, z. B. einen Nickel- oder Platindraht, der in der Mitte einer horizontalen Glasröhre durch eine Feder straff ausgespannt ist. Diese befindet sich in einem Bade konstanter Temperatur θ_0 und ist mit dem zu untersuchenden Gase von passendem Druck gefüllt, so daß die Strömung ohne Einfluß ist. Im stationären Zustande wird die Stromstärke und der Widerstand des Drahtes gemessen, woraus sich seine Temperatur θ und die Heizenergie Q ergibt. Die Energie Q_0, die durch Strahlung verlorengeht, bestimmt man durch einen Versuch, wobei im Glasrohr das Vakuum hergestellt

$\frac{(Q - Q_0)(\ln R - \ln r)}{2\pi l (\theta - \theta_0)}$, wo R den inneren Radius des Glasrohres, r den Radius und l die Länge des Heizdrahtes bezeichnet, und zwar diejenige Länge, welche zwischen den etwa 3 cm von den Enden angebrachten dünnen Spannungsleitungen liegt, die den Widerstand begrenzen, so daß von der Wärmeableitung nach den Enden abgesehen werden kann.

S. WEBER[15]) berechnet im einzelnen die geringen Korrektionen, die an dieser Formel wegen Strahlung, Ableitung der Elektroden, Dicke der Rohrwandung anzubringen sind, und bestimmt für den letzten Zweck die Leitfähigkeit des Glases. Der Einfluß der Strömung wurde dadurch ausgeschaltet, daß man mit dem Druck des Gases so weit heruntering, bis die Werte für die Wärmeleitung konstant wurden. WEBER findet, daß der Einfluß der Strömung bei senkrechter Stellung des Glasrohrs geringer ist als bei horizontaler, so daß man bei der ersten Anordnung bis zu höheren Drucken konstante Werte erhält.

Geht man mit der Verdünnung des Gases weiter herunter, so hört die Konstanz seines Leitvermögens auf, und zwar nimmt es ab. Die Ursache davon liegt in dem Temperatursprung, der an der Oberfläche des Heizdrahtes entsteht, wenn dessen Durchmesser vergleichbar wird mit der mittleren freien Weglänge der Moleküle (KUNDT u. WARBURG, v. SMOLUCHOWSKI[16]), GEHRCKE, KNUDSEN). An der festen Oberfläche ist dieser Sprung $\Delta\theta = -\gamma\, \partial\theta/\partial n$, wo n die Richtung der Normale bezeichnet und $\gamma = \alpha/p$, also umgekehrt proportional dem Gasdruck und damit proportional der freien Weglänge. Für die Heizenergie ergibt sich alsdann:

$$Q = \frac{2\pi l \lambda (\theta - \theta_0)}{\ln \frac{R}{r} + \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r}\right)}.$$

EUCKEN[17]) sowie GOLDSCHMIDT eliminieren den Einfluß der Enden, indem sie zwei Rohre benutzen, ein kurzes und ein langes, jedes mit einem entsprechenden Heizdraht, die beide von demselben Strom durchflossen werden. Man zieht dann die in dem kurzen Draht entwickelte Wärme von derjenigen des langen Drahtes ab und erhält:

$$\frac{(E_1 - E_2) I}{4{,}184} = \frac{2\pi\lambda\,(l_1 - l_2)}{\ln R - \ln r}(\theta - \theta_0).$$

Statt eines doppelten Glasrohrs kann der in Fig. 110 dargestellte Apparat dienen, wo die Drähte in 2 mm weite Kupfer- oder Silberröhrchen eingespannt sind, die mit einem großen Kupferstück K verlötet sind. Die Berührung der Drähte mit dem Metallrohr wird durch ein an

15) S. WEBER, Ann. Phys. 54, 325 u. 437. 1917.
16) M. v. SMOLUCHOWSKI, Ann. Phys. 35, 983. 1911

den Enden übergeschobenes Stück eines Glas- oder Tonröhrchens vermieden. Ebenso sind die Zuleitungen d d d voneinander durch Glimmer isoliert. Das Ganze ruht auf Metallspänen in einem Glasrohr, das in ein Temperaturbad eingesetzt wird.

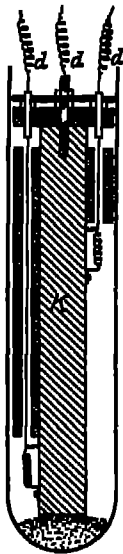



Fig. 110 Stationärer Wärmestrom in Flüssigkeiten und Gasen.

Das ältere Abkühlungsverfahren (STEFAN, KUNDT und WARBURG, WINKELMANN)[18]) wendet einen veränderlichen Wärmezustand an. Bei der einfachsten Anordnung kühlt sich ein Thermometer mit kugelförmigem oder zylinderförmigem Gefäß ab, das in den Hals eines Glaskolbens eingeschmolzen ist. Das Gas wird durch einen seitlichen Ansatz eingeleitet (Fig. 111). Der erwärmte Glaskolben wird in ein kälteres Bad konstanter Temperatur ϑ_0 eingeführt und der Gang des Thermometers mit der Zeit beobachtet. Vielfach ist nach dieser Methode das Wärmeleitvermögen verschiedener Gase mit dem der Luft verglichen. Die Wärmeabgabe des Thermometers durch Strahlung wird dadurch eliminiert, daß man seine Abkühlung in verschieden großen Glaskolben vornimmt, wobei die Strahlung S nicht geändert wird. Beziehen sich die Indizes l und g auf Luft und Gas,

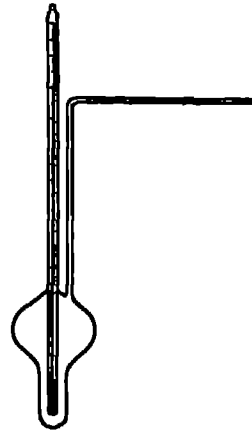



Fig. 111. Abkühlung in Gasen.

und bezeichnen v und v′ die Abkühlungsgeschwindigkeiten in den beiden Kolben, so ist $v_l = c\lambda_l + S$; $v_g = c\lambda_g + S$; $v'_l = c'\lambda_l + S$; $v'_g = c'\lambda_g + S$ und $\frac{\lambda_g}{\lambda_l} = \frac{v_g - v'_g}{v_l - v'_l}$. Besitzt das Thermometer die Temperatur $\theta_0, \theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$ zur Zeit $0, t_1, t_2 \dots t_n$, so ist $v_1 = \frac{\ln(\theta_0 - \vartheta_0) - \ln(\theta_1 - \vartheta_0)}{t_1}$,

$$v_2 = \frac{\ln(\theta_0 - \vartheta_0) - \ln(\theta_2 - \vartheta_0)}{t_2} \quad \dots\dots \quad v_n = \frac{\ln(\theta_0 - \vartheta_0) - \ln(\theta_n - \vartheta_0)}{t_n}.$$

Die Werte $v_1, v_2, \dots$ nehmen mit abnehmender Temperatur ebenfalls ab, weil Leitfähigkeit und Strahlung sinken. Als Mittelwert benutzt man:

$$v = \frac{n \ln(\theta_0 - \vartheta_0) - \{\ln(\theta_1 - \vartheta_0) + \ln(\theta_2 - \vartheta_0) \dots + \ln(\theta_n - \vartheta_0)\}}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

der sich auf die Temp. $\frac{\theta_0 + \vartheta_0}{2} - \frac{t_1 + 2t_2 + 3t_3 + \dots + n t_n}{4(t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n)}$ bezieht.

Auf diese Weise läßt sich auch der Temperaturkoeffizient des Leitver mögens eines Gases oder Dampfes bestimmen.

Für eine absolute Bestimmung des Leitvermögens wird ein Thermo meter, dessen kugelförmiges Gefäß den Radius r und die Temperatur θ besitze, in eine Glaskugel vom Radius R und der Temperatur 0 angebracht In der Zeit dt gehe alsdann die Wärmemenge dQ_1 durch Leitung und dQ_2 durch Strahlung an die Glashülle über, wodurch das Thermometer um $c\,d\theta$ abgekühlt werde, wo c die Wärmekapazität bedeutet. Alsdann ist wenn σ die Strahlungskonstante bezeichnet,

$$-c\,d\theta = d\,Q_1 + d\,Q_2 = 4\,\pi\,r\,R\,\lambda\frac{\theta\,dt}{R-r} + 4\,\pi\,r^2\,\sigma\,\theta\,dt \text{ oder}$$

$$-c\frac{d\theta}{dt} = \frac{4\pi\,r^2\,\theta}{c}\left(\frac{\lambda R}{r\,(R-r)} + \sigma\right).$$

Die Ableitung gilt nur für kleine Temperaturunterschiede, wo nach dem NEWTONschen Abkühlungsgesetz gerechnet werden kann. Ist die Glas kugel evakuiert, so verschwindet das erste Glied in der Klammer und man bestimmt σ; alsdann nach der vollständigen Gleichung λ.

III. Elektrizität.

Sechzehntes Kapitel.

Elektrische Grundmaße[1]).

1. Der elektrische Stromkreis.

Für die Spannung E, die Stromstärke I und den Widerstand R eines von Gleichstrom durchflossenen Leiters gilt das OHMsche Gesetz in der Form: $E = I R$. Für jeden Verzweigungspunkt ist die Summe der zufließenden und der abfließenden Ströme gleich, also $\Sigma I = 0$, und für jeden geschlossenen Stromkreis ist $\Sigma (E - I R) = 0$ (KIRCHHOFF 1847).

Bei Wechselströmen, wo wir den einfachen Sinusstrom $i = i_m \sin \omega t$ als Beispiel wählen, ist zu unterscheiden zwischen dem augenblicklichen Wert i und dem Scheitelwert i_m, $\omega = 2\pi\nu$ heißt Kreisfrequenz, $\nu = 1/T$ Frequenz, T Periode. Ferner ist die effektive Stromstärke I definiert als der Mittelwert $I = \sqrt{\mathfrak{M}(i^2)} = \left[\frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt\right]^{\frac{1}{2}}$; die arithmetische oder mittlere Stromstärke als der ohne Rücksicht auf das Vorzeichen gebildete Mittelwert $\mathfrak{M}(i) = \frac{1}{T}\int_0^T i\,dt$, und die elektrolytische Stromstärke als das mit Rücksicht auf das Zeichen gebildete Mittel $\mathfrak{M}(i)$, das bei symmetrischem Stromverlauf Null ist. Für die Spannung p gelten entsprechende Definitionen.

Der Quotient $f = \sqrt{\mathfrak{M}(i^2)} : \mathfrak{M}(i)$ heißt Formfaktor und hat für die Sinuskurve den Wert 1,111, da für diesen Stromverlauf

$$\sqrt{\mathfrak{M}(i^2)} = i_m/\sqrt{2} \text{ und } \mathfrak{M}(i) = 2\,i_m/\pi \text{ ist.}$$

In einem Leiter ohne Induktivität und Kapazität, welcher den Widerstand R besitzt, bringt eine an die Enden angelegte Wechselspannung $p_m \sin \omega t$ den Wechselstrom $p_m/R \cdot \sin \omega t$ hervor. Besitzt der Leiter jedoch außer dem Widerstande R noch die Induktivität L und die

---

Kapazität C, so erhält man als Augenblickswert der Stromstärke $i = \frac{p_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin(\omega t - \varphi)$; sie verläuft ebenfalls sinusförmig, ist aber gegen die Spannung um die Zeit $\varphi/\omega = T\varphi/2\pi$ verschoben. Der Ausdruck $\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = S$ heißt scheinbarer Widerstand (Impedanz), $R' = S \cos\varphi$ wirksamer und $B = S \sin\varphi$ Blindwiderstand (Induktanz). Für den Phasenwinkel φ besteht die Beziehung $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}$. Je nachdem $L \gtrless 1/(\omega^2 C)$, ist φ positiv oder negativ, d. h. der Strom bleibt hinter der Spannung zurück oder läuft ihr voraus. Für $\omega^2 = 1/LC$ oder $T = 2\pi\sqrt{LC}$ tritt Resonanz ein; der Strom verläuft nach dem OHMschen Gesetz.

Für die Rechnung gebraucht man zweckmäßig komplexe Zahlen, die als Symbole für Spannung, Strom und Widerstand dienen. Bezeichnet man $\sqrt{-1}$ mit j, so bedeuten $\mathfrak{E} = P e^{j\varphi_1}$ oder $\mathfrak{J} = I e^{j\varphi_2}$ eine sinusförmig verlaufende Spannung oder Stromstärke von dem Effektivwert P oder I und der Phase φ_1 oder φ_2, ferner ist $\mathfrak{E} = \mathfrak{J}\mathfrak{R}$, wo für den Widerstandsoperator $\mathfrak{R}$ zu setzen ist: $\mathfrak{R} = R' + jB = S(\cos\varphi + j\sin\varphi) = S e^{j\varphi} = R'(1 + j\operatorname{tg}\varphi)$. Für einen reinen Widerstand R, eine Induktivität L oder eine Kapazität C ist der Widerstandsoperator $\mathfrak{R} = R$, $j\omega L$ oder $1/(j\omega C) = -j/(\omega C)$.

2. Das Widerstandsmaß.

Die Grundmaße für das internationale System der elektrischen Einheiten herzustellen, ist den einzelnen Ländern überlassen. Sie haben besondere Institute zu diesem Zwecke geschaffen, die die Einheitlichkeit dadurch wahrten, daß sie ihre Ergebnisse verglichen haben. Die Arbeiten, die in Deutschland gesetzlich der Phys.-Techn. Reichsanstalt obliegen, betrafen zunächst die Einheit des Widerstandes, das Ohm.

Die Vorschrift, welche hierfür eine Quecksilbersäule gewählt hat, gründet sich auf die Erfahrungen, welche bei der Festsetzung des Ohms mit diesem Metall vorlagen. W. SIEMENS (1860) hatte Quecksilber als Stoff für Normalwiderstände vorgeschlagen, und die SIEMENSsche Einheit, eine Quecksilbersäule von 0°,1 m Länge und 1 mm² Querschnitt, hatte schon mehrere Jahrzehnte die Grundlage für die Widerstandsmessungen gebildet. Der gute Erfolg beruhte darauf, daß der Stoff leicht zu reinigen ist und als Flüssigkeit stets dasselbe Gefüge aufweist. Bei der Festsetzung des Ohms hat man die Länge der Quecksilbersäule auf 106,300 cm

h das Gewicht der Säule von 14,4251 g definiert, um von der Be-
ıng zwischen dem Meter und dem Kilogramm unabhängig zu sein.
ɔh die Entdeckung der Isotopen des Quecksilbers, deren Dichte
0,3⁰/₀₀ schwankt, während ihr spezifischer Widerstand gleich ist[1]),
ıne Unbestimmtheit in die Definition gekommen, die sich dadurch
itigen läßt, daß die Verwendung natürlichen Quecksilbers von der
te 13,5955 bei 0° vorgeschrieben wird.

ɪs Quecksilber füllt man in Glaskapillaren von gleichmäßigem Quer-
itt und versieht sie für die elektrische Messung mit kugelförmigen
gefäßen von 4 cm Durchmesser, in welche die amalgamierten Platin-
te S und P (Fig. 112) für die Zuleitung des Stromes und die Abnahme
Spannung eingeschmolzen sind. Vorher ist das Rohr wie ein Thermo-
ɜr zu kalibrieren und seine Länge auf dem Komparator zu messen,
ɩdem es passend abgeschliffen ist. Beide Arbeiten werden erleichtert,
ı das Rohr eine Teilung trägt. Das Quecksilber wird im Vakuum
Rohr eingefüllt, das sich bei allen Messungen auf der Temperatur des
ıelzenden Eises befindet. Beträgt die genaue Länge des Rohrs, die
1,06 cm nicht sehr verschieden sein soll, l cm und die Queck-
rfüllung bei 0° m g, so erhält man für
Widerstand R: $R = K \frac{14,4521}{m} \frac{l^2}{(106,3)^2}$ Ohm,
K einen Kaliberfaktor[2]) bezeichnet. Die
ge l ist wegen des Ausbreitungswiderstandes
$0,80 (r_1 + r_2)$ zu vergrößern, wenn r_1 und r_2
Halbmesser der Rohrenden bedeuten[4]). Der

Fig 112. Ohmrohr-verschluß

erstand ϱ einer Quecksilbersäule von konstanter Größe wächst
der Temperatur nach der Formel[5]):

$$\varrho = \varrho_0 (1 + 0,000\,889\,15\, t + 0,000\,000\,993\,60\, t^2),$$

ach die wirkliche Zunahme eines Quecksilberwiderstandes unter
ücksichtigung der Ausdehnung der Glaskapillare zu berechnen ist.
an kann annehmen, daß die Grundmaße für den Widerstand, die
verschiedenen Ländern, z. B. in Deutschland[6]), England[7]), den
einigten Staaten[8]) u. a., angefertigt worden sind, innerhalb $2 \cdot 10^{-5}$
reinstimmen.

W. Jaeger und H. v. Steinwehr, ZS. f. Phys. 7, 111. 1921.
A. Leman, Wiss. Abhandl. der P. T. Reichsanstalt 2, 359. 1895.
P. J. Daniell, Phil. Mag. 30, 137 u. 248. 1915.
) W. Jaeger und v. Steinwehr, Ann. Ph. 48, 1165 u. 45, 1089. 1914.
W. Jaeger, Wiss. Abhandl. d. P. T. Reichsanstalt 2, 379. 1895.
F. E. Smith, Phil. Trans. A 204, 57. 1905.

Die Verwendung von Quecksilberwiderständen als Gebrauchsnormale, wozu man früher wohl U-förmige, geometrisch nicht ausgemessene Rohre benutzte, die ein für allemal gefüllt und zugeschmolzen an die ausgemessenen Normale angeschlossen waren, ist aufgegeben worden. Man benutzt für diesen Zweck Widerstände aus Manganin in Beträgen von 0,0001—100 000 Ohm; die kleineren werden aus blankem Blech, die größeren von 0,1 Ohm an aus seideumsponnenem Draht hergestellt, der auf ein mit Seidenband isoliertes Messingrohr bifilar gewickelt wird. Das Ganze wird mit Schellack getränkt und nach längerer Alterung bei etwa 120° in eine Messingbüchse eingeschlossen, in welche dicke Kupferzuleitungen durch den Hartgummideckel isoliert hineinführen. Starke Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre wirken auf den Schellack ein, so daß infolge der wechselnden Spannung des aufgewickelten Drahtes namentlich die Widerstände von höherem Betrage geringe Änderungen zeigen können. Diese werden vermieden, wenn man die Büchsen hermetisch verschließt oder in einer Atmosphäre konstanter Feuchtigkeit aufbewahrt.

Das Manganin ist eine Legierung von 84 Kupfer, 12 Mangan und 4 Nickel und zeichnet sich durch einen kleinen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes von etwa $2 \cdot 10^{-6}$ und durch eine geringe Thermokraft gegen Kupfer aus. FEUSSNER und LINDECK[9]), durch Untersuchungen WESTONS auf Manganlegierungen aufmerksam geworden, haben diese systematisch geprüft, die passendste herausgesucht und durch zweckmäßigen Bau Widerstandsnormale geschaffen, die in bezug auf Haltbarkeit und Konstanz die vorhandenen weit übertrafen und auch bis heute darin nicht überholt worden sind.

Bei der Messung verbindet man die Widerstandsnormale durch Quecksilbernäpfe, in welche die Stromzuleitungen eingehängt werden. Die Widerstände selbst sind von Petroleum umgeben, das durch einen Rührer bewegt wird, damit sich die Temperatur ausgleicht (Fig. 113). Widerstände kleinen Betrages besitzen besondere Klemmen zur Abnahme des Potentials.

3. Das Strommaß.

Das Grundmaß der elektrischen Stromstärke bildet das Silbervoltameter. Nach der Londoner Vereinbarung (1908) gilt als internationales Ampère diejenige Stromstärke, die in einer Sekunde 0,001 118 00 g Silber abscheidet. Man benutzt für das Silbervoltameter als Kathode einen Platinbecher P (Fig. 114), als Anode einen Silberzylinder A und als

[9]) K. FEUSSNER u. ST. LINDECK, Wiss. Abhandl. d. P.-T. Reichsanstalt 2,

Elektrolyt eine wässerige Lösung von Silbernitrat, deren Gehalt 20 — 40% beträgt. Die Stromdichte soll an der Anode 0,2, an der Kathode 0,02 Ampère/cm² nicht überschreiten. Unter der Anode ist ein Glasschälchen G angebracht, das den Anodenschlamm aufnimmt, der für die Wägung nicht in Betracht kommt. Zu vermeiden sind Umwicklungen der Anode mit organischen Stoffen wie Seidengaze oder Filtrierpapier, die man früher wohl benutzte, um den Anodenschlamm von der Kathode fernzuhalten. Der Niederschlag ist vor der Wägung mit heißem Wasser auszuwaschen und zu trocknen.

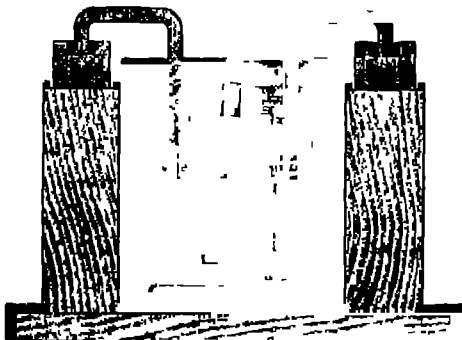



Fig. 113. Normalwiderstand.

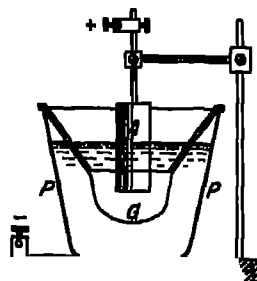



Fig. 114. Silbervoltameter.

Bei den neueren Arbeiten mit dem Silbervoltameter[10]) ist eine Genauigkeit von 0,01% erreicht worden, wenn alle Vorsichtsmaßregeln beachtet wurden. Zur praktischen Strommessung eignet es sich nur in den Fällen, wo der Mittelwert einer Stromstärke für eine längere Zeit zu bestimmen ist.

4. Das Spannungsmaß.

Als Grundmaß der Spannung dient das Westonelement. Gemäß der Definition des Volt ist das Spannungsmaß aus den Maßen des Widerstandes und der Stromstärke abzuleiten. Zu diesem Zweck wird ein Strom, dessen Stärke im Voltameter gemessen wird, durch einen Normalwiderstand geschickt und an dessen Enden eine Spannung von bekanntem Betrage erzeugt, mit dem sich das Spannungsmaß vergleichen läßt. Auf Grund solcher von verschiedenen Seiten ausgeführten Messungen gilt nach internationaler Vereinbarung seit dem 1. Januar 1911 für die EMK des Westonelements:

$$E_t = 1{,}0183_0 - 0{,}0_4\,406\,(t-20) - 0{,}0_6\,95\,(t-20)^2 - 0{,}0_7\,(t-20)^3 \text{ Volt}$$ [11]).

[10]) H. v. Steinwehr, ZS. f. Instr. 1913, 321 u. 353. — Haga u. Boerema, Arch. néerl. 3, 324. 1913. — E. B. Rosa, G. W. Vinal u. A. S. McDaniel, Bull. Bur. Stand. 10, 475. 1914.

Der positive Pol des Elements besteht aus Quecksilber, der neg tive aus Kadmiumamalgam mit 12 — 13% Kadmium, der Ele trolyt aus einer gesättigten, wässerigen Lösung von Kadmiumsulf ($CdSO_4 + {}^8/_3 H_2O$) und der Depolarisator aus Merkurosulfat. Dic Stoffe bilden ein reversibeles Element nach dem Schema:

$$Cd + Hg_2SO_4 \rightleftarrows CdSO_4 + 2Hg\,.$$

Für die Glasgefäße der Elemente ist die H-Form in Gebrauch (RA LEIGH 1885), deren beide Schenkel unten den eingeschmolzenen Poldra aus Platin aufweisen. Über dem positiven befindet sich Quecksilb bedeckt mit einer Paste aus Merkurosulfat, Kristallen aus Kadmiu sulfat und der Lösung dieses Salzes, über dem negativen Kadmiu amalgam nebst Salzkristallen. Die Verbindung zwischen beiden wi durch Lösung von Kadmiumsulfat hergestellt. Die Öffnungen c

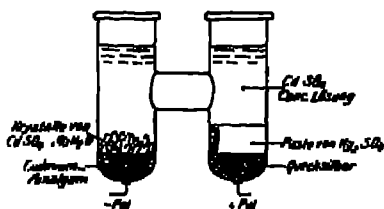



Fig. 115. Westonelement.

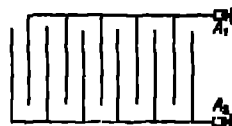



Fig. 116. Kondensator.

Schenkel sind durch Paraffin, Kork und Siegellack geschlossen (Fig. 1 oder besser zugeschmolzen.

Zu beachten ist, daß die Weston Instrument Co. außerdem Eleme liefert, die eine bei 4° gesättigte Lösung enthalten und deshalb c bei dieser Temperatur mit dem internationalen Grundmaß übere stimmen. Ihre EMK beträgt 1,0187 Volt, ihr Temperaturkoeffizient sehr klein.

Vor 1895 bediente man sich des CLARKschen Elements als Spannun normal, das einen viel größeren Temperaturkoeffizienten besitzt und d halb vom Westonelement verdrängt ist. Die EMK wird dargestellt du die Gleichung: $E_t = 1{,}4324 - 0{,}00119\,(t - 15) - 0{,}000007\,(t - 15)^2$ V Sowohl im Amalgam als auch im Sulfat tritt hier an die Stelle Kadmiums das Zink.

Einwände, welche gegen das Westonelement erhoben wurden, v es wegen der Umwandlung des 12,5 proz. Cadmiumamalgams bei wöhnlicher Temperatur metastabil wäre, haben sich als grundlos wiesen[12]).

5. Die Maße für Kapazität und für Induktivität.

Als Grundmaße für das Farad, die internationale Einheit der Kapazität, werden Kondensatoren benutzt, deren Dielektrikum aus einem Gase, also am bequemsten aus Luft, besteht. Da die Dielektrizitätskonstante der Gase klein ist, so haben solche Kondensatoren nur eine geringe Kapazität, aber sie sind unabhängig von der Frequenz der Wechselströme, bei deren Messung keine Verluste im Dielektrikum auftreten.

Ein solcher Luftkondensator besteht aus einer Reihe paralleler Metallplatten A_1 A_2, welche in geringem Abstand von etwa 1—2 mm aufeinanderfolgen und abwechselnd in leitender Verbindung stehen (Fig 116). Eins der beiden Plattensysteme liegt am Gehäuse, damit die Kapazität von der Umgebung unabhängig ist. Man unterscheidet Zylinder- und Plattenkondensatoren, je nachdem die Elemente aus Zylindern oder ebenen Platten gebildet sind. Die letzteren bestehen meistens aus einem leichten Metall, z. B. einer Aluminiumlegierung.

Näherungsweise läßt sich die Kapazität eines Luftkondensators aus der Zahl der Elemente schätzen, da für ein einzelnes von der Fläche F die Kapazität $K = F/(4\pi d)$, wenn d den Plattenabstand bezeichnet. Der genaue Wert in Mikrofarad muß durch den Versuch bestimmt werden. Der Temperaturkoeffizient der gebräuchlichen Formen beträgt etwa $3 \cdot 10^{-5}$ bei 18°[13]).

Als Grundmaße der Induktivität, deren internationale Einheit das Henry bildet, dienen Spulen, deren Drahtwindungen zweckmäßig auf eisenfreie Marmorrollen gewickelt werden. Der Marmor wird im Vakuum erhitzt und mit Paraffin getränkt. Für Spulen, die nur eine Windungslage besitzen, kann man die Induktivität berechnen[14]), mehrlagige werden elektrisch genauer bestimmt.

Wegen der Hautwirkung der Wechselströme, welche die Stromlinien höherer Frequenzen an die Oberfläche des Leiters drängt, wickelt man die Normalspulen aus dünnem Draht oder aus Litzen, die aus feinen, voneinander isolierten, verdrillten Drähten bestehen [Dolezalek 1903][15]).

Um die Kapazität der Normalspulen von der Umgebung unabhängig zu machen, setzt man die Rollen in Kästen, deren Wände durch unterteilte Stanniolbelegung elektrostatisch abgeschirmt werden (Giebe 1911).

---

[13]) E. Giebe, ZS. f. Instr. 1909, 269 u. 301.

[14]) E. Grüneisen u. E. Giebe, Wiss. Abh. d. P.-T. Reichsanstalt 5, 1. 1921.

Siebzehntes Kapitel.

Widerstand.

1. Anordnung und Schaltung von Widerständen.

Die Widerstandsmessungen beziehen sich einerseits auf die Ve gleichung von Widerstandsnormalen, andererseits bezwecken sie d Bestimmung des Leitvermögens von Stoffen, das nicht nur ein au gezeichnetes Kennzeichen der chemischen Zusammensetzung und d Gefüges bildet, sondern auch ein scharfes Merkmal des Wärmezustand Namentlich trifft das letztere für die reinen Metalle zu, die neben eine kleinen Leitvermögen einen großen Temperaturkoeffizienten besitze während sich die Legierungen umgekehrt verhalten. Aus diesem Grun werden Meß- und Vorschaltwiderstände aus Legierungen, Widerstanc thermometer aus reinen Metallen hergestellt

Der Widerstand R eines Leiters von der Länge l cm und dem Que schnitt F cm² beträgt $R = l/(\varkappa F) = \varrho l/F = \varrho C$, wo $\varkappa$ das Leitve mögen und ϱ den spezifischen Widerstand bezeichnet. Die Einheit d Leitvermögens hat derjenige Stoff, von dem der cm-Würfel den Wid stand von 1 Ohm aufweist; die Einheit ist cm^{-1}. Ohm^{-1}. Die Größe die Widerstandskapazität eines Leiters, hängt nur von der Gestalt a

Widerstände können parallel oder hintereinander geschaltet werd Im ersten Falle erhält man die Summe der Leitwerte $\Sigma\, 1/R$, im zweit die Summe der Widerstände ΣR. Für Wechselstrom gilt diese Reg für die Zusammensetzung der Widerstandsoperatoren $\mathfrak{R}$ (S. 202).

Für die Widerstandsnormale wird fast ausschließlich Manganin v wendet. Die früher gebräuchlichen Neusilberlegierungen hatten et den zehnfachen Temperaturkoeffizienten, kleineren spezifischen Wid stand und besaßen, namentlich wenn sie Zink enthielten, keine genügen Konstanz. Konstantan, eine Legierung aus 60 Kupfer und 40 Nick weist zwar auch eine ebenso geringe Temperaturabhängigkeit v Manganin auf, aber eine weit größere Thermokraft gegen Kupfer u wird deshalb weniger zu Meßwiderständen als zu Vorschaltwiderstänc verarbeitet. Für diesen Zweck dienen auch Eisenlegierungen, wie d Kruppin (30% Ni) und Cekas (Ni-Cr-Fe) wegen ihres hohen spezifisch Widerstandes, der doppelt so groß wie der des Manganins ist und dem d Quecksilbers gleichkommt.

Drahtwiderstände wickelt man bifilar, um die Selbstinduktion nied zu halten. Bei großen Beträgen, etwa von 500 Ohm aufwärts, ze diese Wicklung aber eine störende Kapazität. Deshalb wickelt man d Draht bifilar nur in kurzen Abschnitten auf, d. h. man kehrt den Wi

gelangt ist, so daß benachbarte Windungen keine großen Spannungsunterschiede aufweisen (CHAPERON 1889). Geringe Induktivität und Kapazität sind natürlich besonders für Wechselstrommessungen erwünscht, wozu man den Draht zweckmäßig auf Glimmerstreifen wickelt (FEUSSNER 1899). Auch doppelt geschlitzte Porzellanrohre P (Fig. 117) werden benutzt, deren Draht nach jeder Windung durch die Schlitze gesteckt und auf der anderen Seite in umgekehrtem Sinne weiter gewickelt wird[1]. Für vorübergehende Zwecke spannt man den Draht wohl als dicht nebeneinanderlaufende parallele Hin- und Rückleitung auf; die geringe Induktivität und Kapazität solcher Anordnungen läßt sich berechnen.

Sehr große Widerstände stellt man durch Platinierung von Porzellankörpern her; die dünne Metallschicht wird nach dem Einbrennen in

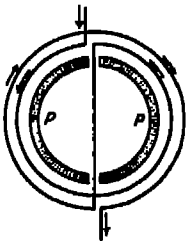



Fig. 117. Induktionsfreie Drahtwicklung.

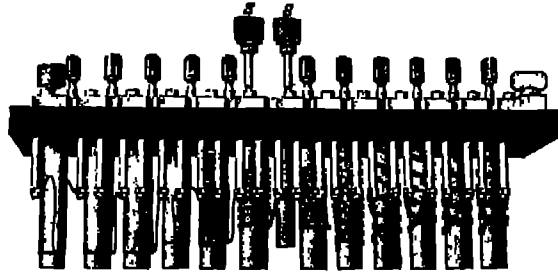



Fig. 118. Stöpselrheostat.

passender Weise unterteilt. Auch Kohlenstoff, metallisches Silizium oder Metalloxyd werden zu diesem Zwecke in Glas eingeschmolzen. Ferner kommen Silitwiderstände (Siliziumkarbid) als Stäbe oder Röhren zur Verwendung; ihr Widerstand sinkt bei hoher Spannung.

Meßwiderstände schließt man, geteilt in Dekaden und ihre Unterteile, in Kästen ein, deren Hartgummideckel Reihen von Messingklötzen tragen, zu denen die Zuleitungen der einzelnen Widerstände geführt werden. Die Klötze sind durch konische Messingstöpsel miteinander verbunden, durch deren Entfernen die Widerstände eingeschaltet werden und die so gut eingeschliffen sein sollen, daß der Widerstand einer einzelnen solcher Verbindung unter $1 \cdot 10^{-4}$ Ohm bleibt. Die Einteilung der Dekaden wechselt ebenso wie bei den Gewichtsätzen. Zum Abzweigen von Widerständen sind besondere Stöpsel SS (Fig. 118) oder Kontakte mit Schraubverbindungen vorzusehen, damit sich der Widerstandskasten vielseitiger verwenden läßt.

---

[1] H. L. CURTIS und F. W. GROVER, Bull. Bur. Stand. 8, 495, 1912.

Statt der Stöpsel werden häufig auch Kurbeln, seltener Schlitten gebraucht Jede Dekade besteht alsdann aus neun gleichen Widerständen. Die Kontaktwiderstände, deren Anzahl konstant bleibt, können durch gute Federung der Kurbeln klein gehalten werden (Fig. 119).

Vorschaltwiderstände, die nicht so genau wie Meßwiderstände abgeglichen zu werden brauchen, bestehen in der einfachsten Form aus Drahtspiralen oder Blechstreifen, die in Holz- oder Eisenrahmen eingespannt sind und durch passende Schalter hinter- und nebeneinandergeschaltet werden können. Die zweite Anordnung ist namentlich für kleine Widerstände und starke Belastungen wichtig. Vielfach im Gebrauch sind Widerstände, deren Unterteilung durch Schieber erfolgt, welche unmittelbar auf den Drahtwindungen gleiten; diese sind auf isolierte Eisenröhren oder auf Schieferklötze gewickelt. Große Belastungs-

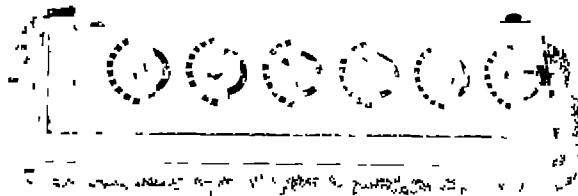



Fig. 119. Kurbelrheostat.

schwankungen vertragen Eisenwiderstände, die in der Wasserstoffatmosphäre geschlossener Glasröhren ausgespannt sind und bei dunkler Rotglut beansprucht werden, wo das Eisen seinen Widerstand stark ändert und sich deshalb zur Stromregelung besonders eignet.

2. Wheatstonesche Brücke.

Die verbreitetste Methode zur Widerstandsmessung benutzt die Wheatstonesche Brückenschaltung (1843). Vier Widerstände r_1, r_2, r_3 und r_4 (Fig. 120) sind hintereinander zu einem Viereck verbunden, an dessen einem Paar gegenüberliegender Ecken die Batterie und an dessen anderem Paar der Stromzeiger liegt. Bezeichnet I die Stromstärke im Batteriezweig, i und r Stromstärke und Widerstand des Galvanometerzweigs der Brücke, so erhält man: $i = I \frac{r_1 r_3 - r_2 r_4}{r(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + (r_1 + r_4)(r_2 + r_3)}$.
Wählt man die vier Widerstände r_1, r_2, r_3, r_4 so, daß der Strom i in der Brücke verschwindet, so ist $r_1 : r_4 = r_2 : r_3$. Diese Beziehung besteht unabhängig von der Stärke des Stromes I und gilt auch dann noch, wenn die Batterie und der Stromzeiger vertauscht werden. Wählt man für r_1 und r_4 zwei gleiche Widerstände, so sind auch r_2 und r_3 einander

einen Widerstandskasten und gleicht dessen Widerstand so ab, daß $i = 0$ wird. Ist dieses nicht genau möglich, so interpoliert man zwischen benachbarten Werten von r_3 nach den Ausschlägen des Stromzeigers.

Bequem ist es, statt zweier gleicher Widerstände r_1 und r_4 eine Verzweigungsbüchse zu setzen, die einmal die beiden gleichen Widerstände von z. B. 100 Ohm und dazwischen noch zwei kleine Zusatzwiderstände von je 0,05 Ohm enthält. Je nach der Stellung des Kontakthebels (Fig 121) erhält man also die Verhältnisse 100,05 : 100,05, 100,1 . 100 oder 100 . 100,1. Beobachtet man nun bei der Vergleichung der nahezu gleich gemachten Widerstände r_2 und r_3 bei der mittleren Stellung des Kontakthebels am Stromzeiger den Ausschlag e_1 und nach Vorschaltung von 0,1 Ohm zu dem r_2 benachbarten Widerstande r_1 den Ausschlag e_1'

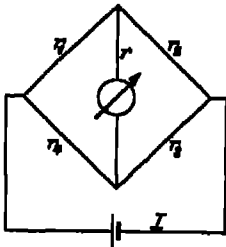



Fig. 120. Wheatstonesche Brücke.

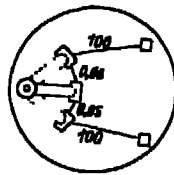



Fig. 121. Verzweigungsbüchse.

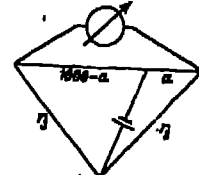



Fig. 122. Gerader Brückendraht.

und entsprechend nach Umkehrung der Verzweigungsbüchse, so daß r_1 und r_4 vertauscht werden, die Ausschläge e_2 und e_2', so ist $\frac{r_2}{r_3} = 1 + 0{,}001 \frac{e_1 - e_2}{(e_1 - e_2) - (e_1' - e_2')}$. Je feiner die Messung, um so kleiner wird man den Zusatzwiderstand wählen und ihn dann zweckmäßig durch Nebenschluß eines großen Widerstandes R zu dem Brückenzweig r_1 oder r_4 herstellen, so daß r_1 übergeht in $R\, r_1/(R + r_1)$.

Abgesehen von dem Verhältnis $r_1 : r_4 = 1 : 1$, wird wohl am meisten das Verhältnis 1 : 10 benutzt. Man stellt es sich her, indem z. B. drei Einer untereinander verglichen werden, darauf 1 + 1 mit 2, 1 + 1 + 1 + 2 mit 5 und zum Schluß 1 + 1 + 1 + 2 + 5 mit 10. Bei der Messung mit $r_1 : r_4 = 10$ können natürlich r_1 und r_4 nicht mehr vertauscht werden.

Widerstände, die in einem beliebigen Verhältnis stehen, lassen sich vergleichen mit der Drahtbrücke, auf der sich ein Schleifkontakt verschieben läßt (Kirchhoff 1857). Ein gerader, längs eines Maßstabes gespannter Draht tritt an die Stelle der beiden Zweige r_1 und r_4, die durch die Bewegung des Schleifkontakts in jedes Verhältnis gebracht

von Stromquelle und Strommesser erlaubt; doch ist es zweckmäßig, letztere an den Schleifkontakt zu legen, weil die Verbindung sicherer ist, wenn an der Übergangsstelle die höhere Spannung herrscht. Denkt man sich den Meßdraht entsprechend dem Gebrauche in 1000 Teile geteilt, so ist bei dem Verschwinden des Brückenstroms $r_2 : r_1 = a : (1000 - a)$, wo a den Teilstrich bezeichnet, auf dem der Kontakt einsteht. Für das Verhältnis $a : (1000 - a)$ hat OBACH Tabellen berechnet; zuweilen sind diese Werte auch an den Meßdraht geschrieben.

Als Meßdraht empfiehlt sich ein solcher aus Manganin von 1 m Länge und einem gleichmäßigen Durchmesser von etwa 0,3 mm. Die Genauigkeit wächst mit der Drahtlänge. Da aber die Ablesung dann unbequem wird, benutzt man die Walzenbrücke (F. KOHLRAUSCH 1880), bei der der Meßdraht in zehn Windungen auf einen Marmorzylinder gewickelt ist (Fig. 123). Den beweglichen Kontakt bildet ein auf eine Achse sich verschiebendes Röllchen, das auf der drehbaren Drahtwalze gleitet. Der Draht ist in 1000 Teile geteilt: die Hunderte ergeben sich aus der Stellung des Röllchens, die Zehner und Einer aus derjenigen der Teilung, die am Rande der Walze abgelesen wird. Die Genauigkeit der Widerstandsmessung ist am größten, wenn der Kontakt in der Mitte steht. Einem Einstellungsfehler von $^1/_{10}$ Teilstrich entspricht bei dem Strich:

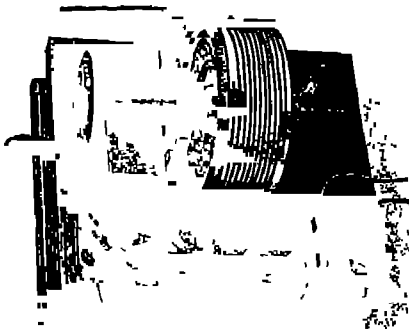



Fig. 123. Walzenbrücke.

10	50	100	200	300	400	500
990	950	900	800	700	600	

ein Fehler im gemessenen Widerstande von $\frac{1}{99}$ $\frac{1}{470}$ $\frac{1}{900}$ $\frac{1}{1600}$ $\frac{1}{2100}$ $\frac{1}{2400}$ $\frac{1}{2500}$.

Die Genauigkeit läßt sich vergrößern, wenn man dem Meßdraht noch Widerstände vorschaltet. Besitzt dieser den Widerstand R, so fügt man noch zwei Widerstände 4,5 R hinzu, die man durch Stöpsel entweder einzeln auf jede Seite oder zusammen auf einer Seite an den Meßdraht schließen kann. Statt des Verhältnisses $a : (1000 - a)$ erhält man alsdann: $(4500 + a) : (4500 + 1000 - a) = \left(450 + \frac{a}{10}\right) : \left(1000 - \left(450 + \frac{a}{10}\right)\right)$ und $a : (10000 - a) = \frac{a}{10} : \left(1000 - \frac{a}{10}\right)$ oder $(9000 + a) : (1000 - a) = \left(900 + \frac{a}{10}\right) : \left(1000 - \left(900 + \frac{a}{10}\right)\right)$. Die beiden letzten Werte unterscheiden sich danach, ob der kleine oder große Widerstand an dem Nullende des Meßdrahts liegt.

Um die Genauigkeit voll auszunutzen, kann man natürlich auch bei dem Meßdraht den unbekannten Widerstand mit einem veränderlichen Widerstandskasten messen und immer in der Nähe der Mitte 500 den Schleifkontakt einstellen.

Wir haben bisher vorausgesetzt, daß die Messung mit Gleichstrom ausgeführt wird. In vielen Fällen müssen die Widerstände aber mit Wechselstrom in der Brücke bestimmt werden. Zu dem OHMschen Widerstand kommen dann noch Induktivität und Kapazität der Zweige und beeinflussen den Stromanzeiger der Brücke, wozu dann ein akustisches oder optisches Telephon, ein Vibrationsgalvanometer,[1] ein Dynamometer usw. dient. Statt der Gleichung $r_1 r_3 = r_2 r_4$ als Bedingung für die Stromlosigkeit der Brücke erhält man bei Sinusstrom: $\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_4 = \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3$, wo $\mathfrak{R} = S e^{j\varphi}$ den Widerstandsoperator (S. 202) bezeichnet. Bei der Zerlegung in den reellen und imaginären Teil entstehen zwei Bedingungsgleichungen $S_1 S_4 = S_2 S_3$ und $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$, denen bei der Abgleichung der Brücke unabhängig voneinander Genüge zu leisten ist; es ist also nicht allein der Widerstand, sondern auch die Induktivität oder die Kapazität der Zweige zu ändern.

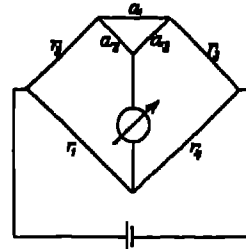



Fig. 124. THOMSONsche Brücke.

THOMSONsche Brücke. Widerstände lassen sich nicht widerstandsfrei miteinander verbinden, und die Übergangswiderstände fallen um so mehr ins Gewicht, je kleiner die zu verbindenden Widerstände sind. Auch sind die Widerstandsnormale mit besonderen Strom- und Potentialzuleitungen versehen, so daß man die letzteren nicht unmittelbar an die anderer Widerstände anschließen kann. In solchen Fällen benutzt man statt der gewöhnlichen Brücke eine von W. THOMSON (1862) angegebene Schaltung, die Fig. 124 zeigt. r_2 und r_3 sind wieder die zu vergleichenden Widerstände, a_2 und a_3 bezeichnet man als Überbrückungswiderstände, die im Verhältnis $r_2 : r_3$ gewählt werden, wodurch der Brückenzweig die Verbindung a gleichsam im Verhältnis $r_2 : r_3$ teilt, so daß für das Verschwinden des Brückenstroms dieselbe Bedingung wie früher bestehen bleibt, jedoch unabhängig von der Verbindung a[2]).

3. Messung mit den Differentialgalvanometer.

Die Vergleichung zweier Widerstände kann auch dadurch ausgeführt werden, daß man sie in einen Stromkreis hintereinander schaltet und die Spannung an ihren Enden vergleicht. Das Verfahren, welches eine

Spannungsmessung erfordert, soll später beschrieben werden. Zunächst wird die Messung mit dem Differentialgalvanometer behandelt, bei dem zwei Wicklungen in entgegengesetzter Richtung von Strömen durchflossen werden und sich in ihrer Wirkung aufheben, wenn die Ströme gleich sind. Damit die sie erzeugenden Spannungen gleich sind, müssen auch die Widerstände beider Wicklungen gleich sein[3]).

Fig. 125 zeigt die Schaltung der beiden zu vergleichenden Widerstände R_1 und R_2, die jeder so an eine der beiden Galvanometerwicklungen angeschlossen sind, daß diese einander entgegenwirken. Der Einfluß der Verbindungen wird beseitigt, wenn man die beiden mittleren Zuleitungen vertauscht, wie es in Fig. 126 dargestellt ist und als Schaltung des übergreifenden Nebenschlusses bezeichnet wird (F. Kohlrausch 1883). Verschwindet der Galvanometerausschlag für $R_1 = R_2$

Fig. 125. Differentialgalvanometer im Nebenschluß.

Fig. 126. Differentialgalvanometer im übergreifenden Nebenschluß.

Fig 127. Umschalter.

und nachdem die Stromquelle von A B′ nach A′ B verlegt ist, für $R_1 = R_2'$, so ist $R_1 = \frac{1}{2}(R_2 + R_2')$. Für diesen Zweck bedient man sich eines Umschalters mit sechs Quecksilbernäpfen (Fig. 127). Die beiden Galvanometerwicklungen brauchen weder wirkungs- noch widerstandsgleich zu sein; die Genauigkeit kann auf 10^{-6} gebracht werden.

Für die Messung ungleicher Widerstände hat Hausrath[4]) ein Verfahren auf derselben Grundlage angegeben.

Für die **Vergleichung von Widerstandsätzen** und ihre Berechnung kommen dieselben Methoden wie bei der Kalibrierung von Maßstäben und Thermometern zur Anwendung. Liegen n Widerstände vor, so werden die Unterschiede von je zweien in allen $n(n-1)/2$ Kombinationen beobachtet. Daraus ergeben sich mit Einschluß der Identitäten $1 - 1 = 0$, $2 - 2 = 0$ ... folgende Terme:

[3]) W. Jaeger, ZS. f. Instr. 1904, 288.

$$\begin{array}{cccc}
1-1 & 2-1 & \ldots & n-1 \\
1-2 & 2-2 & \ldots & n-2 \\
1-3 & 2-3 & \ldots & n-3 \\
\vdots & \vdots & & \\
1-n & 2-n & \ldots & n-n \\
\hline
n(1-M) & n(2-M) & \ldots & n(n-M) \\
=S_1 & =S_2 & & =Sn,
\end{array}$$

wo $M = \frac{1}{n}(1+2\ldots+n)$, und man erhält·

$$1 = M + \frac{1}{n}S_1; \quad 2 = M + \frac{1}{n}S_2 \ldots n = M + \frac{1}{n}S_n.$$

4. Metallische Leiter.

Bei der Messung des Leitvermögens fester Körper ist zu beachten, daß diese Eigenschaft von der mechanischen und thermischen Vorbehandlung abhängt. Namentlich bei den Metallen ist dies der Fall, weshalb man sie nicht immer in Drahtform untersuchen kann, die für die Widerstandsmessung bequem ist, sondern oft dicke Stäbe zur Verfügung hat Man kann alsdann nicht die einfache Brückenschaltung anwenden, sondern muß die THOMSONsche Anordnung oder die Spannungsvergleichung mit einem bekannten Widerstande von derselben Größenordnung benutzen. Von solchen Stäben wird die Spannung mit einem Schneidenpaar abgenommen, womit man zugleich die Gleichmäßigkeit längerer Probestücke prüfen kann, wenn die Schneiden an verschiedenen Stellen aufgesetzt werden. Thermoströme werden durch Kommutieren des Stromes eliminiert. Ist l die Länge, F der Querschnitt und R der Widerstand des Probestücks in Ohm, so ergibt sich für das Leitvermögen $\varkappa = l/(RF)$ $Ohm^{-1} cm^{-1}$.

Der spezifische Widerstand $\varrho = 1/\varkappa$ der einfachen Metalle nimmt im allgemeinen mit wachsender Reinheit ab, während sein Temperaturkoeffizient zunimmt, so daß dessen mittlerer Wert zwischen 0° und 100° ein scharfes Kennzeichen für die Reinheit bildet. Mit sinkender Temperatur fällt der Widerstand und erreicht mit der Annäherung an den absoluten Nullpunkt einen sehr kleinen Grenzwert, der wohl von geringen Verunreinigungen herrührt, die auch bei den reinsten Probestücken noch vorhanden sind. Einen Widerstand von viel geringerer Größenordnung, die sog. Überleitfähigkeit, zeigen bei der Temperatur des flüssigen Heliums Quecksilber, Blei, Zinn und Thallium (KAMERLINGH ONNES 1913).

Der Widerstand der Legierungen läßt sich nur in wenigen Fällen(nur

berechnen; meistens ist er viel größer als derjenige der reinen Metalle und der Temperaturkoeffizient kleiner.

Die folgende Tabelle enthält für 18° den spezifischen Widerstand $\varrho_{18} \cdot 10^4$ — diese Zahl gibt den Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt — und das Maximum des mittleren Temperaturkoeffizienten $\alpha = 10\,(\varrho_{100} - \varrho_0)/\varrho_0$.

Spezifischer Widerstand bei 18° und sein mittlerer Temperaturkoeffizient zwischen 0° und 100°.

Reine Metalle.

	$10^4 \cdot \varrho_{18}$	α		$10^4 \cdot \varrho_{18}$	α		$10^4 \cdot \varrho_{18}$	α
Ag	0,016	4,4	Ir	0,053	4,1	Pd	0,107	3,8
Al	0,029	4,7	K	0,070	5,8	Pt	0,107	3,92
Au	0,023	4,0	Li	0,093	4,9	Rh	0,060	4,4
Bi	1,20	4,5	Mg	0,046	4,0	Sb	0,45	4,7
Cd	0,076	4,2	Mo	0,047	4,6	Sn	0,113	4,6
Co	0,066	6,6	Na	0,049	5,5	Ta	0,12	3,5
Cu	0,017	4,3	Ni	0,070	6,7	Tl	0,190	4,0
Fe	0,086	6,6	Os	0,1	4	Wo	0,056	4,8
Hg	0,958	0,90	Pb	0,21	4,2	Zn	0,060	4,2

Legierungen

	$10^4 \cdot \varrho_{18}$	α		$10^4 \cdot \varrho_{18}$	α
Cekas	1,00	+ 0,5	Nickelin	0,40	+ 0,2
Konstantan	0,50	± 0,05	Patentnickel	0,34	0,2
Kruppin	0,85	+ 0,7	Platinsilber	0,27	0,2
Manganin	0,43	± 0,02	Platinrhodium	0,20	1,7

5. Elektrolyte.

Das Leitvermögen von Flüssigkeiten untersucht man wegen der Polarisation mit Wechselstrom von hinreichender Frequenz (F. KOHLRAUSCH und NIPPOLDT 1869) zwischen Elektroden, deren Oberfläche gewöhnlich durch einen Niederschlag von Platinmohr stark vergrößert ist. Besonders wirksam ist ein Zusatz von $^1/_{40}$% Bleiazetat zu der Platinierungsflüssigkeit (3 proz. wässerige Lösung von Platinchlorid). Weil der Einfluß der Polarisation mit der Abnahme sowohl der Stromwechsel als auch des Widerstandes wächst, beobachtet man nicht zu kleine Widerstände, nicht unter 20 Ohm. Zu große, 10^5 Ohm und mehr, sind auch wieder ungünstig, weil ihre Kapazität störend wirkt.

In den meisten Fällen läßt sich ein passender Widerstandswert durch

an der in Fig. 128a dargestellten H-Form z. B. wird danach die Länge und der Querschnitt des Verbindungsrohrs der beiden Schenkel ausgesucht, in welche die Platinelektroden eingeschmolzen sind. Das Gefäß der Fig. 128b besteht nur aus einem Schenkel, in dem beide Elektroden nahe beieinander sitzen; es ist für schlecht leitende Flüssigkeiten bestimmt. Die Form der Gefäße und die Anordnung der Elektroden ist übrigens sehr mannigfaltig. Fig. 128c zeigt eine Tauchelektrode: die Zuführungs-

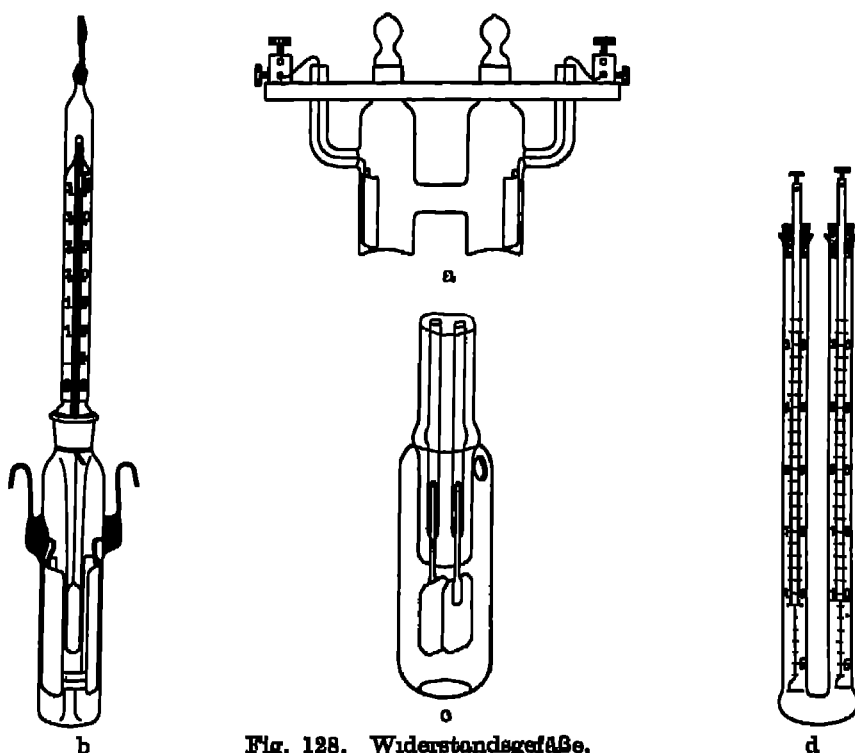



Fig. 128. Widerstandsgefäße.

drähte sind in eine Doppelkapillare eingezogen, an welche unten ein offenes Gefäß mit den Elektroden geschmolzen ist. Mit dieser Vorrichtung begrenzt man eine bestimmte Widerstandskapazität in einem größeren Behälter, dessen Inhalt auf sein Leitvermögen untersucht werden soll. Endlich ist in Fig. 128d ein geteiltes U-Rohr mit beweglichen Elektroden abgebildet. Die Teilung wird so vorgenommen, daß die Kapazität $C = m + n$, wenn die eine Elektrode auf dem Teilstrich m, die andere auf n steht.

Die Widerstandskapazität der Gefäße wird durch die Beobachtung

Rohren bestimmt worden ist. Die folgende Tabelle gibt die Leitvermögen solcher wässeriger Normallösungen[5]):

1. Maximal leitende Schwefelsäure; 30 Gewichtsprozente H_2SO_4, Dichte bei 18° = 1,223.
2. Maximal leitende Magnesiumsulfatlösung, 17,4 Gewichtsprozente $MgSO_4$, s_{18} = 1,190.
3. Gesättigte Chlornatriumlösung (26,4 % NaCl).
4. Normal-Chlorkaliumlös.; 74,55[6]) g KCl in 1 l Lösung, s_{18} = 1,04492.
5. 1/10 „ „ 7,455 g KCl in 1 l Lösung, s_{18} = 1,00343.
6. 1/50 „ „ 1,491 g KCl in 1 l Lösung.
7. 1/100 „ „ 0,746 g KCl in 1 l Lösung.
8. Gesättigte Gipslösung.

Leitvermögen $\varkappa$ von Normallösungen bei t°.

t	1	2	3	4	5	6	7	8
15°	0,7028	0,04555	0,20146	0,09252	0,01048	0,002243	0,001147	0,001734
16	7151	4676	20620	09441	1072	2294	1173	1782
17	7275	4799	21115	09631	1095	2345	1199	1831
18	7398	4922	21605	09822	1119	2397	1225	1880
19	7522	5046	22099	10014	1143	2449	1251	1928
20	7645	5171	22596	10207	1167	2501	1278	1976
21	7768	5297	23096	10400	1191	2553	1305	2024
22	7890	5424	23600	10594	1215	2606	1332	2071
23	8013	5551	2411	10789	1239	2659	1359	2118
24	8135	5679	2462	10984	1264	2712	1386	2164
25	8257	5808	2513	11180	1288	2765	1413	2211

Reine Flüssigkeiten leiten im allgemeinen schlecht; bessere Leiter sind die Salzlösungen, namentlich die wässerigen, deren Leitvermögen jedoch bei 18° noch nicht die Einheit ganz erreicht. Es wächst bedeutend mit steigender Temperatur, meistens auf 1° um mehrere Prozent. Die Abhängigkeit von der Konzentration wird übersichtlicher, wenn man nicht das Leitvermögen selbst, sondern das spezifische Leitvermögen, d. h. das Leitvermögen dividiert durch die Konzentration betrachtet. Diese mißt man nach der Anzahl der Gramm-Äquivalente η (oder auch der Gramm-Moleküle), die im Kubikzentimeter der Lösung enthalten sind. $\varkappa/\eta = \Lambda$ heißt Äquivalent-Leitvermögen. Es nimmt mit wachsender Konzentration ab. Für starke Verdünnungen gilt ziemlich genau $\Lambda = \Lambda_\infty - C\sqrt{\eta}$, wo Λ_∞ den maximalen Grenzwert bei unendlicher Verdünnung und C eine Konstante bedeutet.

[5]) F. Kohlrausch, L. Holborn u. H. Diesselhorst, Wied. Ann. 64, 417.

Als Beispiel eines schlechten Leiters sei das reine Wasser angeführt, das im Vakuum destilliert und gemessen bei 18° ein Leitvermögen von $4 \cdot 10^{-8}$ aufweist (KOHLRAUSCH und HEYDWEILLER 1894)[7]. An der Luft, wo besonders die Aufnahme von Kohlensäure das Leitvermögen herabsetzt, kommt man nur bis $1 \cdot 10^{-6}$. Andere Lösungsmittel besitzen bei äußerster Reinheit ein noch schlechteres Leitvermögen: so wurde gemessen für Äther $1 \cdot 10^{-15}$, Schwefelkohlenstoff $8 \cdot 10^{-18}$ und Tetrakohlenstoff $4 \cdot 10^{-18}$. Solche Stoffe ergeben natürlich große Widerstände, die wegen ihrer Kapazität nicht mit Wechselstrom, sondern mit Gleichstromstößen von kurzer Dauer untersucht werden. Längerer Stromschluß würde den Widerstand ändern, da die geringe Zahl der Ionen an die Elektroden wandert. Gewöhnlich nimmt dabei der Widerstand zu, ebenso die Reinheit, für welche auch hier das Leitvermögen ein empfindliches Merkmal bildet.

Ein reiches Feld für die Messung mit Wechselstrom bieten ferner die geschmolzenen Salze, die allerdings alle bei höherer Temperatur zu untersuchen sind. Hier erreicht $\varkappa$ etwa den Wert 5. Als Widerstandsgefäße werden solche aus Porzellan oder Quarzglas benutzt, die man bei Zimmertemperatur mit den Normallösungen eichen kann. Die Widerstandskapazität ist dann nach der Formel $C_t = C_0 (1 - \beta t)$ auf die hohe Temperatur umzurechnen, wo β den linearen Ausdehnungskoeffizienten des Gefäßstoffes bezeichnet. Soll C_t unmittelbar gemessen werden, so läßt sich geschmolzener Kalisalpeter, der bei 334° schmilzt, als Eichflüssigkeit benutzen. Das Leitvermögen $\varkappa$ beträgt[8]):

350°	0,666	450°	0,966
400	0,818	500	1,107

Das Salz ändert sich langsam während längeren Gebrauchs, indem es Sauerstoff abgibt.

Das Leitvermögen geschmolzener Salze steigt meistens linear mit der Temperatur an, aber etwa zehnmal langsamer als dasjenige der Lösungen.

Auch in festem Zustande leiten viele Salze elektrolytisch, wie durch die Überführung von Ionen nachgewiesen worden ist. Aber die Leitfähigkeit ist dann gewöhnlich sehr viel geringer als bei den geschmolzenen Stoffen. Dasselbe gilt für Glas, Porzellan usw. Jodsilber zeigt jedoch in einer Modifikation das umgekehrte Verhalten.

Selbst die schwache Leitfähigkeit, welche die als Isolatoren bezeichneten Körper bei gewöhnlicher Temperatur aufweisen, wird als elektrolytischer Art anzusprechen sein. Die folgende Tabelle enthält den

---

[7]) Näheres s. bei F. KOHLRAUSCH und L. HOLBORN, Leitvermögen der Elektrolyte. 2. Auflage 1916.

spezifischen Widerstand bei 22° und gewöhnlichem Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre für solche Isolatoren, die wegen ihrer Verwendung bei dem Bau von Apparaten von Wichtigkeit sind.

Spezifischer Widerstand von Isolatoren.

	ϱ_{22}		ϱ_{22}		ϱ_{22}
Schiefer	$1 \cdot 10^{8}$	Paraff. Mahagoniholz	$4 \cdot 10^{13}$	Paraffin	$1 \cdot 10^{16}$
Elfenbein	$2 \cdot 10^{8}$	Quarz, ∥-Achse	$1 \cdot 10^{14}$	Ambroid	$5 \cdot 10^{16}$
Fieber	$1 \cdot 10^{9}$	Quarz, ⊥-Achse	$2 \cdot 10^{16}$	Kolophonium	$5 \cdot 10^{16}$
Paraff. Walnußholz	$1 \cdot 10^{10}$	Wachs	$1 \cdot 10^{14}$	Schwefel	$1 \cdot 10^{17}$
Zelluloid	$2 \cdot 10^{10}$	Porzellan	$3 \cdot 10^{14}$	Hartgummi	$1 \cdot 10^{16}$
Thüringer Glas	$1 \cdot 10^{9}$	Schellack	$1 \cdot 10^{16}$	Quarzglas	$5 \cdot 10^{19}$

Mit wachsender Temperatur nehmen diese Werte ab. Auch wird der Widerstand mannigfach durch den Zustand der Oberfläche und deren Leitung beeinflußt.

Achtzehntes Kapitel.

Strom.

1. Voltameter.

Das Silbervoltameter, das das Grundmaß für die Stromstärke bildet, hat ebenso wie andere Apparate dieser Art für praktische Messungen nur noch geringe Bedeutung. Im Laboratorium findet es Verwendung bei elektrochemischen Arbeiten, wo es darauf ankommt, das Integral einer Stromstärke über einen längeren Zeitraum zu messen. Für diesen Zweck können auch das Kupfer- und das Wasservoltameter dienen. Wird von dem Strome I in der Zeit von z Sekunden die Menge m ausgeschieden oder zersetzt, so ist $I = \frac{1}{\mathfrak{E}} \frac{m}{z}$, wo das elektrochemische Äquivalent $\mathfrak{E}$ folgende Werte besitzt:

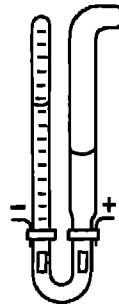
	Ag	Cu	H	O	H_2O	J	
Äquivalent-Gew.	107,88	31,8	1,008	8,000	9,008	126,92	
$\mathfrak{E}$	1,118	0,3294	0,010446	0,08290	0,09335	1,31502	mg/Coulomb

Mit 1 Grammäquivalent wandern 107,88/0,001 118 = 96 500 Coulomb.

Das Kupfervoltameter ist ungenauer als das Silbervoltameter und wird für stärkere Ströme gebraucht. In eine ungesättigte Lösung von Kupfersulfat (Dichte = 1,1) hängen eine Anode aus Kupfer und ganz untergetaucht eine Kathode aus Platin oder Kupfer. Letztere wird zum Schluß abgespült, mit Fließpapier und dann im Exsikkator getrocknet. Die Stromdichte soll 1 A/(25 cm²) nicht übersteigen[1].

Für das Wasservoltameter benutzt man 10 — 20 proz. Schwefelsäure als Elektrolyt, die mit Elektroden aus Platin in mit Teilung versehenen Röhren zersetzt wird. Bei starken Strömen fängt man Wasserstoff und Sauerstoff gemeinsam auf, bei schwachen nur den Wasserstoff (Fig. 29). Das elektrochemische Äquivalent von 0,0933 mg Wasser liefert bei seiner Zersetzung 0,1740 cm^3 Knallgas von 0° und 760 mm Quecksilberdruck. Im Voltameter steht das Gas unter dem Druck $p = b - \frac{1}{13} h - 0{,}9\, e$, wo b den Barometerstand, h die Höhe der Schwefelsäure und e den Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei der Beobachtungstemperatur bedeutet[2]).

Fig. 129. Wasservoltameter.

Als Elektrolyt des Jodvoltameters dient eine Lösung von Jodkalium, als Elektrode Platiniridium, weil Platin von dem abgeschiedenen Jod angegriffen wird. Dieses bestimmt man an der Anode durch Titrierung mit arseniger Säure[3]).

2. Elektromagnetische Strommesser.

Die Instrumente zur Strommessung, welche auf der elektromagnetischen Wirkung des Stromleiters beruhen, zerfallen in zwei Gattungen: die eine bilden die Nadelgalvanometer, bei denen der feste Stromleiter auf einen beweglichen Magnet wirkt, die andere sind die Drehspulgalvanometer, bei denen sich der Stromleiter in einem magnetischen Felde bewegt. Dabei ist zu bemerken, daß der Sprachgebrauch im allgemeinen als Galvanometer ein Meßgerät bezeichnet, das für schwache Ströme bestimmt und in seiner Empfindlichkeit vielfach in weiten Grenzen veränderlich ist, während der Ausdruck Strommesser auf Geräte angewendet wird, welche stärkere Ströme vertragen und eine Skale besitzen, die die Stromstärke in Ampere angibt. Die Grenze ist natürlich nicht scharf; es gibt Übergangsformen, z. B. unter den Stromzeigern. Instrumente jedoch, welche mit Spiegel und Skale abgelesen werden, heißen allgemein Spiegelgalvanometer. Ihre Systeme erfahren nur kleine Ablenkungen, so daß die in Skalenteilen beobachteten Ausschläge den im Galvanometer fließenden Strömen proportional sind. Wo diese Voraussetzung nicht genau zutrifft, lassen sich leicht empirisch die geringen Korrektionen ermitteln, welche zur Erfüllung dieser Bedingung anzubringen sind.

Das Drehmoment q, welches ein Strom von 1 CGS auf das System ausübt, heißt die dynamische Galvanometerkonstante, und die Größe $C = D/q$,

[3]) F. Kohlrausch, ETZ 1885, 190

wo D die Direktionskraft bedeutet, wird Reduktionsfaktor des Galvanometers genannt; er ist gleich derjenigen Stromstärke, die das System um den Winkel 1 = 57,3° ablenkt Bewirkt der Strom I den Ablenkungswinkel α, so ist $I = C\alpha$; je kleiner C und mithin auch D ist, eine um so geringere Stromstärke reicht hin, einen bestimmten Ausschlag hervorzubringen, um so empfindlicher ist also das Instrument

Von Bedeutung ist noch die Dämpfung des Systems. Durch seine Bewegung wird in dem geschlossenen Galvanometerkreise eine EMK induziert, welche der Winkelgeschwindigkeit v proportional ist. Bezeichnet R den Widerstand in CGS, so entsteht ein Strom von der Stärke qv/R, der das Dämpfungsmoment q^2v/R ausübt. Hierzu kommt noch die meist geringere Dämpfung durch Luftwiderstand usw., die auch bei offenem Kreise bestehen bleibt, so daß die Dämpfungskonstante p gleich $p_0 + q^2/R$ zu setzen ist

a) Nadelgalvanometer. Die Nadelgalvanometer bilden die ältere Gattung. Bei ihr wirkt der feste Stromleiter als Multiplikator aus vielen Windungen auf eine Magnetnadel, die ihre Richtkraft gewöhnlich durch den Erdmagnetismus empfängt. Die Empfindlichkeit wird erhöht, indem man mit dem Träger der Nadel eine zweite in entgegengesetzter Richtung verbindet, auf welche ein zweiter Multiplikator einwirkt. Dadurch wird die Richtkraft verringert und die Stromwirkung vergrößert. Die erste Wirkung wird auch in der Weise hervorgerufen, daß man das Erdfeld durch einen äußeren Magnet schwächt, was freilich den Übelstand mit sich bringt, daß Schwankungen des Feldes in verstärktem Maße die Ruhelage der Nadel beeinflussen.

Fig. 130. Astatisches Magnetpaar.

Die Verbindung zweier gleicher Nadeln NS und N'S' zu einem System liefert, wenn zwischen den beiden magnetischen Achsen ein geringer Winkel bleibt, eine Resultante n s, die auf der ursprünglichen Richtung senkrecht steht (Fig. 130). Sie kann durch einen dritten kleinen Magnet aufgehoben werden, der ihr entgegenwirkt. Sind die beiden Magnete eines Systems ungleich, so kann man das Feld des einen schwächen, indem man ihn mit einem Ring aus weichem Eisendraht umgibt.

Als in den Städten die Störungen des Erdfeldes sich stark vermehrten und namentlich die Straßenbahnen durch die vagabundierenden Erdströme unangenehm heftige und plötzliche Schwankungen verursachten, hat man die Galvanometer magnetisch abzuschirmen versucht, indem man sie mit einer Hülle aus weichem Eisen umgab, die der besseren Wirkung wegen unterteilt wurde. Im Innern des Eisenpanzers erzeugte

Die Direktionskraft ist gleich $M\mathfrak{H}(1+\theta)$, wo M das magnetische Moment der Nadel, $\mathfrak{H}$ die Feldstärke und θ das Torsionsverhältnis bedeutet. Da das letztere meistens klein — man benutzt zur Aufhängung leichter Systeme zweckmäßig Quarzfäden — und auch die Wirkung dem Moment M proportional ist, so fällt diese Größe bei einer einfachen, unastatisierten Magnetnadel heraus.

Die Stromempfindlichkeit I/α hängt bei einem astatischen System außer von dem magnetischen Moment noch von der Spulenfunktion G ab, die von der Gestalt und der Anordnung des Multiplikators bestimmt wird. Um einen Vergleich der verschiedenen Formen zu ermöglichen, bezieht man sie auf einen Widerstand von 1 Ohm und setzt $G = g\sqrt{R}$, wobei von dem Raume, den die Umspinnung der Windungen einnimmt, abgesehen wird. Unter dieser Voraussetzung wächst α mit der Zahl der Multiplikatorwindungen, der Widerstand R aber mit dem Quadrat. Demnach ergibt sich $C = \frac{I}{\alpha} = \frac{D}{q} = \frac{D}{Mg\sqrt{R}}$, und da $D = \frac{\pi^2 K}{T^2}$, wo K das Trägheitsmoment und T die (halbe) Schwingungsdauer des Systems bezeichnet, so folgt $C = \frac{\pi^2 K}{Mg T^2 \sqrt{R}}$.

Der Ausschlag e_0 (mm), welchen ein Strom von 10^{-6} Ampere geben würde, wenn er bei einer Schwingungsdauer T von 5^s, einem Widerstand von 1 Ohm und einem Skalenabstand von 1000 mm beobachtet wird, ist als normale Stromempfindlichkeit festgesetzt[4]). Wird der Ausschlag e bei der Schwingungsdauer T, dem Skalenabstand A und dem Widerstand R für dieselbe Stromstärke gemessen, so ist $e_0 = e\frac{25\,000}{A T^2 \sqrt{R}}$.

Für das Nadelgalvanometer ist es am günstigsten, wenn der Widerstand R_g des Multiplikators dem übrigen Widerstand R_a des Stromkreises gleich ist. Dann wächst der Galvanometerstrom proportional $1/(R_g+R_a)$, der Ausschlag proportional $\sqrt{R_g}/(R_g+R_a)$, einer Größe, die für $R_g = R_a$ das Maximum annimmt.

Die Bauart der Spiegelgalvanometer ist entsprechend den verschiedenartigen Magnetsystemen und Anwendungszwecken sehr mannigfaltig. Für das Bestreben, die Empfindlichkeit zu steigern, ist die Richtschnur: M/K muß vergrößert werden. Zur Erreichung dieses Ziels hat man nach dem Vorgang KELVINS statt einer Nadel ein System von kurzen parallelen Lamellen nahe beieinander angeordnet, das durch ein zweites in größerem Abstand an der Aufhängung befestigtes System astasiert wird. Dieses trägt außerdem den Spiegel S' und den Luftdämpfer D (Fig. 131). Jedes

[4]) H. DU BOIS u. H. RUBENS, Ann. Phys. 2, 84. 1900. — Auf ähnliche

System ist von einer aus zwei Hälften bestehenden Spule umgeben. Durch die Verkürzung der einzelnen Magnetchen auf 1 bis 1,5 mm und Verkleinerung des Spiegels auf einen Durchmesser von 2 mm hat PASCHEN[5]) Gehänge angefertigt, die nicht mehr als 5 mg wogen. Zur Aufhängung diente ein so dünner Quarzfaden, daß seine Torsion die magnetische Direktionskraft nicht merklich vergrößerte Hiermit wurde eine normale Empfindlichkeit von 4000 erreicht, die später bei Anwendung stärkerer Stahlmagnetchen auf 7500 wuchs. Zur Beseitigung der Luftdämpfung hing das neue Gehänge im Vakuum.

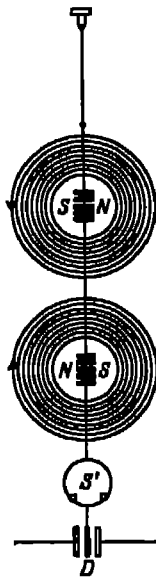



Fig. 131. Nadelgalvanometer.

DU BOIS und RUBENS[6]) haben mit ihrem nach der KELVINschen Bauart hergestellten Spiegelgalvanometer normale Stromempfindlichkeiten von 10, 30 und 90 erreicht, je nach Größe der Gehänge, deren Gewichte 1, 0,3 und 0,1 g betrugen. Später wurde für ein einfaches, nicht astasiertes Gehänge eine magnetische Abschirmung durch einen dreifachen Panzer aus weichem Eisen eingerichtet, der innerste Panzer war dabei zugleich der Träger der Multiplikatorwindungen und hatte ebenso wie der mittlere eine kugelförmige Gestalt. Zwischen beiden befanden sich zwei Richtungsmagnete, die von außen gedreht werden konnten. Dem Instrument waren zwei Gehänge beigegeben; für das schwerere wird eine normale Empfindlichkeit von 60—80 angegeben, für das leichte die zehnfache.

An vielen Orten läßt sich die Empfindlichkeit der Galvanometer wegen der unvermeidlichen Erschütterungen, die der Stadtverkehr verursacht, nicht ausnutzen. Eine größere Ruhe wird dadurch erreicht, daß man die Instrumente auf eine schwere Platte stellt, die mit drei Drähten an einer Wandkonsole aufgehängt wird und deren Schwingungen durch in Öl tauchende Flügel oder durch untergelegte lose Watte gedämpft werden [JULIUS[7])].

Zur Messung starker Ströme finden die Nadelgalvanometer nur noch selten Anwendung Früher diente hierzu die Tangentenbussole (POUILLET 1837), mit der W. WEBER (1840) die erste absolute Strommessung ausführte.

Die Magnetnadel befindet sich in der Mitte eines weiten kreisförmigen Ringes aus einer oder mehreren Windungen, deren Ebene in den magne-

[5]) F. PASCHEN, ZS. f. Instr. 1893, 13 und Phys. ZS. 1913, 521.
[6]) H. DU BOIS u. H. RUBENS, ZS. f. Instr. 1900, 65.

tischen Meridian gebracht wird. Ist n die Zahl der Windungen vom Halbmesser r, $\mathfrak{H}$ die horizontale Feldstärke der Erde und α die Ablenkung, welche die Nadel durch den Strom I (Ampere) erfährt, so gilt: $I = \frac{10\, r\, \mathfrak{H}}{2\, n\, \pi} \operatorname{tg} \alpha = C \operatorname{tg} \alpha$. Zur Bestimmung des Reduktionsfaktors C ist der Halbmesser r und die Feldstärke $\mathfrak{H}$ zu messen.

Für absolute Messungen benutzte man kleine Ausschläge, die mit Spiegel und Skale abgelesen wurden. Sonst wurde der Magnet mit einem Zeiger versehen, der auf einer Kreisteilung spielte; die größte Genauigkeit liefern Ausschläge von 45°.

Korrektionen sind an der angegebenen Formel anzubringen wegen des Querschnitts des Drahtringes und der Länge

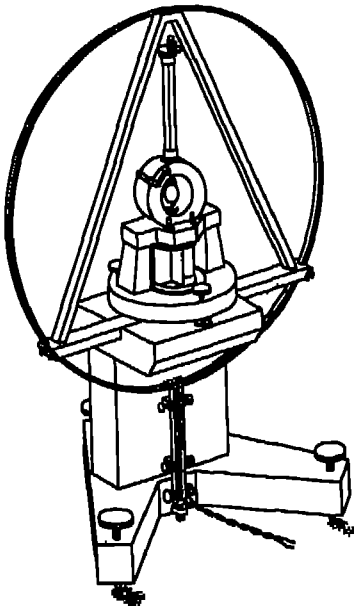



Fig. 132. Tangentenbussole.

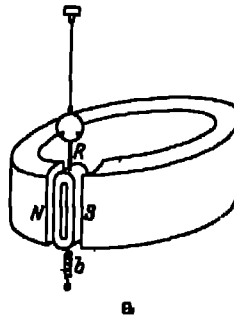
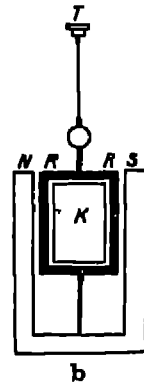



Fig. 133. Drehspulgalvanometer.

der Magnetnadel Verschiebt man die Nadel um $^1/_2$ r senkrecht zu dem Drahtring, so gilt das Tangentengesetz genau (HELMHOLTZ-GAUGAIN 1840). Fig. 132 zeigt die Form einer der beiden Bussolen, mit denen F. und W. KOHLRAUSCH[8]) das elektrochemische Äquivalent des Silbers bestimmten.

Als Sinusbussole bezeichnet man ein Instrument, dessen Drahtring der abgelenkten Nadel nachgedreht wird, so daß sie stets in der Stromebene bleibt. Hierfür gilt streng $I = C \sin \alpha$.

b) Drehspulgalvanometer. Das Drehspulgalvanometer (DEPREZ und D'ARSONVAL 1881) besitzt einen hufeisenförmigen Dauermagnet, zwischen dessen Polen NS die Stromspule R mit ihrer Windungsfläche parallel den Kraftlinien hängt (Fig. 133 a). Vielfach

ist das Innere der Spule noch von einem feststehenden Kern K au weichem Eisen ausgefüllt, so daß für die Drehung nur ein enger Spal bleibt (Fig. 133b). Als Stromzuleitung dient oben die Aufhängun — meistens ein schmales Metallband —, unten eine nachgiebige Feder b Störungen des äußeren magnetischen Feldes haben keinen Einfluß au die Ruhelage, die sich vorzüglich erhält Die Dämpfung wird durch de Widerstand des äußeren Stromkreises bestimmt, da derjenige der Dreh spule zweckmäßig klein gehalten wird Man gebraucht deshalb zu einen Instrument mehrere Einsätze mit Spulen von verschiedenem Wider stande (z. B. 20, 200 oder 10 000 Ohm). Die Feldstärke läßt sich of durch einen verstellbaren magnetischen Nebenschluß ändern. Di Direktionskraft D liefert die Torsion der Aufhängung. für einen Drah von der Länge l und dem Halbmesser r ist $D = \frac{1}{2}\,\Phi\pi\,r^4/l$, und für ei Band von derselben Länge, der Breite b und der Dicke d is $D = \frac{1}{12}\,\Phi\,(b^2 + d^2)\,bd/l$, wo Φ den Torsionsmodul bezeichnet. Bei gleiche Tragkraft ist die Direktionskraft des Bandes kleiner.

Bezeichnet $\mathfrak{H}$ die Stärke des magnetischen Feldes, F die Windungs fläche der Drehspule und R den Widerstand des Schließungskreises, s gilt für die Empfindlichkeit $C = \frac{I}{\alpha} = \frac{D}{q} = \frac{D}{F\mathfrak{H}}$ und für die Spulen dämpfung $p = \frac{q^2}{R} = \frac{F^2\mathfrak{H}^2}{R}$. Der Möglichkeit, die Empfindlichkeit durc Verstärkung des Feldes zu steigern, ist dadurch eine Grenze gesetzt, da gleichzeitig die Dämpfung zunimmt und bald der aperiodische Bewegungs zustand erreicht wird, wo das System kriecht und das Instrument nu durch Vergrößerung des Widerstandes R brauchbar bleibt. Man geh deshalb bis zum aperiodischen Grenzzustand, der den Vorteil aufweist daß nahezu die Empfindlichkeit ein Maximum und die Rückkehrzeit zu Ruhelage ein Minimum ist[9]) (vgl. Kapitel 20).

Für diesen Zustand erhält man unter der Bedingung, daß di Dämpfung bei offenem Stromkreis verschwindet und der Widerstan der Drehspule gegen denjenigen des äußeren Stromkreises gering ist $C = \sqrt{\frac{\pi D}{2T_0R}} = \sqrt{\frac{\pi^3 K}{2\,T_0^3 R}}$, wo T_0 die ungedämpfte Schwingungsdaue und K das Trägheitsmoment des Systems bezeichnet. Für die normal Stromempfindlichkeit ergibt sich $e_0 = \frac{1000\,e}{A}\sqrt{\frac{5}{RT_0}}$.

Ein Vergleich mit der entsprechenden Formel für das Nadel galvanometer (S. 223) zeigt, daß die Empfindlichkeit e in beiden Fälle

[9]) H. Diesselhorst, Ann. Phys. 9, 458, 1902 u. ZS. f. Instr. 1911, 24

mit $\sqrt{R}$ ansteigt, dagegen tritt bei Änderung der Schwingungsdauer ein Unterschied auf: beim Nadelgalvanometer steigt e proportional T^2, während hierfür bei dem Drehspulinstrument $\sqrt{T_0}$ maßgebend ist. Bei diesem ist eine normale Stromempfindlichkeit von 10 bis 30 erreicht. Sie liegt von derjenigen der Nadelgalvanometer nicht weit ab. Doch ist deren Überlegenheit bei größeren Schwingungsdauern nicht zu verkennen[10])

Eine ausgedehnte Verwendung haben die Drehspulinstrumente als Zeigergalvanometer gefunden (Weston) und auf diesem Gebiete die älteren Bauarten verdrängt. Der zu messende Strom wird der Drehspule durch Federn zugeführt, die gleichzeitig die Richtkraft liefern und im Verein mit dem gleichförmigen Feld eine gleichmäßige Teilung der Skale ermöglichen (Fig. 134 a). Meistens ist die Spule in Spitzen gelagert, nur bei den empfindlichsten Instrumenten, die u. a. zur Messung von

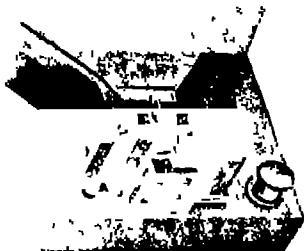



Fig. 134a. Westonzeiger.

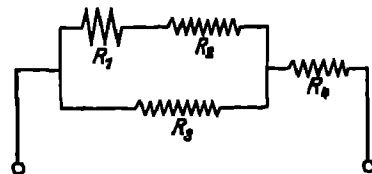



Fig. 134b. Vorschaltwiderstand eines Stromzeigers.

Thermoströmen dienen, ist sie aufgehängt. Die Dämpfung, welche durch die Bewegung des metallenen Spulenrahmens im Magnetfelde erfolgt, ist aperiodisch; die Stellung des schneidenförmigen Zeigers, welcher über einem Spiegel spielt, kann auf $^1/_{10}$ Skalenteil abgelesen werden. Der Einfluß des Erdfeldes beträgt etwa 0,1 %, was ungefähr der Genauigkeit guter Instrumente entspricht, und kann dadurch unschädlich gemacht werden, daß man sie stets in derselben Richtung zum Meridian aufstellt. Natürlich ist auch die unmittelbare Nähe starker magnetischer Felder zu meiden.

Damit die Instrumente für verschiedene Strombereiche gebraucht werden können, sind sie mit Nebenschlüssen von $^1/_9$ R, $^1/_{99}$ R usw. versehen, wodurch der Skalenwert auf das 10-, 100-, . . .-fache gebracht wird, wenn R den ursprünglichen Widerstand bezeichnet. Diese Schaltung macht es wünschenswert, den Einfluß der Temperatur auf die Drehspule R_1, die mit Kupferdraht gewickelt wird, herabzusetzen. Zunächst wird ihr ein Manganinwiderstand R_2 vorgeschaltet und dann zu $(R_1 + R_2)$

[10]) W. Jaeger, ZS. f. Instr. 1903, 261 u. 353; 1908, 206. — E. Dieseen, ZS.

ein Nebenschluß R_3 aus Kupferdraht gelegt; vor dem Ganzen liegt noch ein Manganinwiderstand R_4 (Fig. 134b). Besitzt der Zweig $(R_1 + R_2)$ den Temperaturkoeffizienten a, wohinein außer der Änderung des Widerstandes auch diejenige der Federn zu rechnen ist, ferner R_3 den Koeffizienten b, so muß, da R_4 einen verschwindend kleinen Koeffizienten besitzt, $R_4 = \frac{a R_3}{b-a}$ gemacht werden (SWINBURN).

Das Saitengalvanometer (ADER 1897, EINTHOVEN 1903) besitzt statt der Stromspule einen einfachen, geraden Platindraht oder einen versilberten Quarzfaden, dessen Durchbiegung mit dem Mikroskop beobachtet wird. Die Stromempfindlichkeit und die Dämpfung sind groß; der Widerstand beträgt freilich einige Tausend Ohm[11]).

8. Elektrodynamometer.

Die Elektrodynamometer (W. WEBER 1846) sind nicht auf die Messungen von Gleichstrom beschränkt wie die elektromagnetischen Instrumente, sondern auch für Wechselstrom brauchbar. Sie besitzen eine feste und eine bewegliche Spule, die beide von dem zu messenden Strom hintereinander durchflossen werden. Der Ausschlag, dem die Torsion der Aufhängung oder die Schwere der beweglichen Spule entgegenwirkt, ist daher dem Quadrate der Stromstärke proportional. Bei Wechselstrom wird das Quadrat des Effektivwerts $\frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt$ gemessen. Dabei sind alle Metallteile in der Nähe der Spulen wegen der störenden Induktionswirkungen zu vermeiden.

Die Windungsflächen der beiden Spulen des WEBERschen Dynamometers stehen senkrecht aufeinander, und eine unifilare oder bifilare Aufhängung liefert die Direktionskraft für die bewegliche, die senkrecht zum Meridian gestellt wird; sie darf dann keine Ablenkung erfahren, wenn sie allein vom Strome durchflossen wird. Ebenso muß sie in Ruhe bleiben, wenn sie kurzgeschlossen wird und der Strom allein durch die feste Spule fließt Um Ausschläge nach beiden Seiten zu erhalten, wird die Stromrichtung in einer Spule gewendet. Die Empfindlichkeit wird durch Auswechseln der Aufhängung geändert

Bei dem SIEMENSschen Dynamometer wird die bewegliche Spule stets in die Ruhelage zurückgeführt, indem die Aufhängefeder um den Winkel φ tordiert wird, dem das Quadrat der Stromstärke proportional ist.

Zu den Dynamometern gehören auch die Stromwagen: die bewegliche Spule hängt an einem Wagebalken, und der Anziehung, die sie von einer

oder mehreren konaxialen festen Spulen erfährt, wird durch Gewichte entgegengewirkt. Bei der Wage RAYLEIGHS (Fig. 135a) ist eine bewegliche Spule A vorhanden, die zwischen zwei festen B B′ schwebt, deren Kräfte sich addieren; die andere Seite C der Wage nimmt die Gewichte auf. Mit einem solchen Instrument ist das elektrochemische Äquivalent des Silbers bestimmt worden[12]).

Die KELVINsche Wage[13]) (Fig. 135b) unterscheidet sich von der vorhergehenden dadurch, daß beide Wagebalken Spulen A A′ tragen, welche vom Strome in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, so daß der Einfluß des Erdfeldes wegfällt. Die Anziehung wird oft durch Laufgewichte gemessen. Den beweglichen Spulen wird der Strom durch Kupferbänder zugeführt.

Die HELMHOLTZsche Wage besitzt statt der Mittelschneide eine Aufhängung aus zwei Paar Silberbändern S, die unter einem Winkel von

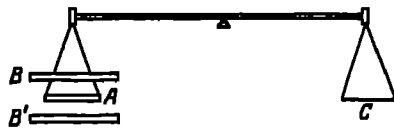



Fig. 135a. RAYLEIGHsche Stromwage.

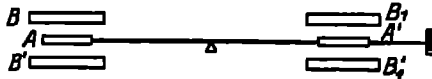



Fig. 135b. KELVINsche Stromwage.

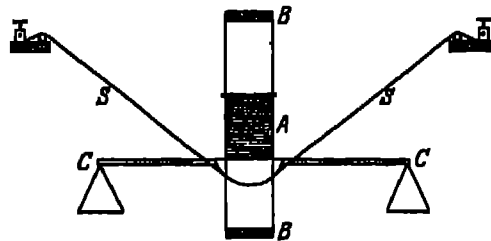



Fig. 136. HELMHOLTZsche Stromwage.

55° geneigt sind und auf denen die Achse der beweglichen Spule A ruht (Fig. 136). Die Bänder dienen gleichzeitig als Stromzuleitung. Das von der festen Spule B ausgeübte Drehmoment wird mit Gewichten gemessen, die an kleinen Wagearmen C wirken. Mit diesem Instrument hat KAHLE[14]) das elektrochemische Äquivalent des Silbers gemessen, wozu die Wirkung eines Stromvierecks aus seinen Abmessungen berechnet wurde.

4. Telephone.

Von den Telephonen, die als Anzeiger für Wechselstrom dienen, ist das Hörtelephon (BELL 1876) zuerst für diesen Zweck benutzt worden. F. KOHLRAUSCH (1880) schlug es für die Messung von elektrolytischen Widerständen in der Brücke vor; als Stromquelle diente ein durch einen NEEFschen Hammer erregter Induktionsapparat. Die Schwingungen,

[12]) Lord RAYLEIGH und Mrs. H. SIDGWICK, Phil. Trans. A 175, 411. 1885.

[13]) W. E. AYRTON, T. MATHER, F. E. SMITH, ebd. A 207, 463. 1908. — E. B. ROSA, N. E. DORSEY, J. M. MILLER, Bull. Bur. Stand. 8, 269. 1912.

welche hierbei zur Wirkung kommen, entsprechen nicht dem Grundton des Unterbrechers, sondern liegen in dem Frequenzgebiet von 800 bis 1200/sec, wo noch Ströme bis 10^{-8} oder 10^{-9} Ampere gehört werden. Ein vollkommenes Schweigen des Telephons erreicht man im allgemeinen nur bei Sinusstrom; doch läßt sich vielfach die Brücke unabhängig von der Stromfrequenz abgleichen und bei Widerstandsmessungen das Tonminimum oft dadurch verbessern, daß man eine sehr geringe Kapazität zu einem Brückenzweig parallel schaltet. Die Eisenmembran, welche durch den zugeführten Wechselstrom unter dem Einfluß der wechselnden magnetischen Anziehung in Schwingungen gerät, spricht auf die verschiedenen Frequenzen nicht gleichmäßig an, so daß die Empfindlichkeit etwas veränderlich ist

Das optische Telephon (M. WIEN 1891) besitzt eine durch ein Eisenplättchen verstärkte Membran aus Neusilber, die zwischen zwei Hufeisenmagneten ausgespannt ist, die ebenso wie beim Hörtelephon von permanenten Magneten mit kleinen Elektromagneten gebildet werden. Die Schwingungen der Membran werden durch einen Stift auf eine eingeklemmte Feder übertragen, die an ihrem freien Ende einen Spiegel trägt. In diesem beobachtet man das Bild eines leuchtenden Spaltes, das bei der Bewegung in ein mehr oder weniger breites Band übergeht. Die Empfindlichkeit beträgt etwa $5 \cdot 10^{-8}$ Ampere.

Im Gegensatz zum Hörtelephon spricht die Membran nur auf ihren Eigenton an; bei Änderung der Frequenz muß man sie anders abstimmen oder auswechseln. Obertöne sind zu vermeiden und reine Sinusströme anzuwenden.

5. Vibrationsgalvanometer.

Das Vibrationsgalvanometer von RUBENS (1895) ähnelt dem Nadelgalvanometer. Eine gespannte Saite, die in Torsionsschwingungen versetzt wird, trägt ein System aus kleinen Eisenstäbchen E, die sich zwischen vier bewickelten Polschuhen zweier Dauermagnete befinden (Fig. 137). Durch den permanenten Magnetismus erregt, werden die Stäbchen von dem in der Wicklung fließenden Wechselstrom in Schwingungen versetzt, deren Frequenz durch die Länge und die Dicke der Saite bestimmt ist.

Bei dem Instrument von SCHERING und SCHMIDT[15]) befindet sich die Nadel zwischen den Polschuhen eines Elektromagnets, und ihre Frequenz wird durch die Erregung dieses Magnets abgestimmt. Das Spaltbild im Spiegel wird bei 1 Mikroampere, der Frequenz 50 und dem Skalenabstand von 1 m auf das Zehnfache verbreitert

AGNEW[16]) verwendet eine feine Stahlnadel D, die an ein Stück Stahl befestigt und mit diesem von einem Dauermagnet NS festgehalten wird (Fig. 138). Unter dem Einfluß eines vom Wechselstrom erregten Elektromagnets gerät das freie Ende der Nadel in Schwingungen, die mit einem Mikroskop beobachtet werden. Bei 270 Ohm Widerstand soll ein Strom von $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ noch merkbar sein.

Vibrationsgalvanometer mit beweglichem Stromleiter weisen als solchen entweder eine einfache Schleife oder eine Spule auf. Mit einem Doppelband aus Kupfer von 1 m Länge erhielten SCHERING und SCHMIDT[17]) einen Abstimmungsbereich von der Frequenz 25 bis 126, die durch Verschiebung von Stegen und Änderung der Spannung eingestellt wurde. Das Band, das in der Nut einer Messingschiene ausgespannt ist, befindet sich auf einer Länge von 14 cm in dem Felde eines Dauermagnets und trägt ein Spiegelchen, in dem das Spaltbild beobachtet

Fig. 137. RUBENSsches Vibrationsgalvanometer.

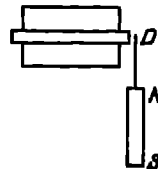



Fig. 138. AGNEWsches Vibrationsgalvanometer.

wird. Die Dämpfung ist stark und die Resonanzkurve verhältnismäßig stumpf, so daß eine geringe Schwankung der Frequenz nicht schadet.

Bei Instrumenten mit Spule ist diese vielfach beiderseits durch ein Band befestigt, so daß mit Stegen und Spannung abgestimmt werden kann. So bei dem Galvanometer von Siemens & Halske[18]), das in seiner Ausführung für Frequenzen von etwa 50 noch Ströme von $5 \cdot 10^{-9}$ A angibt.

Aus der Theorie[19]) des Vibrationsgalvanometers folgt, daß seine Empfindlichkeit stark von der Dämpfung abhängt. Bezeichnet ν die Frequenz des Wechselstromes, ν_0 die Eigenfrequenz des Galvanometersystems, φ den einseitigen Ausschlag in mm/Ampere und φ_0 die Spaltbildverbreiterung in mm/Ampere bei Wechselstrom für $\nu_0 = \nu$, Δ das nat. log. Dekrement ($\Delta < 0{,}1$), $\mathfrak{a} = (\nu - \nu_0)/\nu_0$ die Resonanzbreite, d. h. diejenige Verstimmung, bei der die Empfindlichkeit auf die Hälfte

[16]) P. S. AGNEW, Bull. Bur. Stand. 16, 37. 1920.
[17]) H. SCHERING und R. SCHMIDT, Arch. f. Elt. 1, 254. 1912.
[18]) H. ZÖLLICH, Wiss. Veröff. Siemens-Konzern 1, 1. 1920.

zurückgeht, t die Zeit (sec), in welcher der Ausschlag auf 1% abkli
so gelten nach SCHERING und SCHMIDT die folgenden Beziehungen:

$$\varphi_0 = \pi \varphi \sqrt{2}/\Lambda = 4{,}44\, \varphi/\Lambda,$$
$$a = \sqrt{3}\, \Lambda/\pi \quad = 0{,}55\, \Lambda \;=\; 2{,}45\, \varphi/\varphi_0,$$
$$t = 2{,}30/\Lambda\nu_0 \quad = 1{,}26/a\nu_0.$$

6. Verschiedenartige Strommesser.

Für Gleich- und Wechselstrom anwendbar sind die Instrumente, darauf beruhen, daß weiches Eisen von der Stromspule magnetis und angezogen wird. Sie finden fast nur als Schalttafelinstrumente V wendung, wo sie so weit durchgebildet sind, daß sich ihre Angaben Gleich- und Wechselstrom nur um wenige Prozent unterscheiden Galvanometer im Gebrauch war die Anordnung, bei welcher eine N aus weichem Eisen einen Winkel von 45° mit den Windungsebenen Multiplikators bildete (BELLATI 1883). Der Ausschlag erfolgt nur n einer Seite[20]).

Die durch die Wärme des Stromes bewirkte Ausdehnung des Str leiters wird hauptsächlich zur Messung von Wechselströmen benu da solche Instrumente von der Periodenzahl unabhängig und frei Kapazität und Induktivität sind. Diese Hitzdrahtinstrumente kom besonders für Schalttafeln zur Verwendung; die Verlängerung Stromleiter oder ihre Durchbiegung wird auf einen Zeiger übertra Im Laboratorium steigert man die Wirkung durch Einschluß Hitzdrahts in ein Vakuum und bestimmt die Ausdehnung mit Mikroskop.

Nach einem anderen Verfahren wird die Wärme der Stromleiter die Lötstellen von Thermoelementen übertragen. Beide bringt ma innige Berührung, wobei es einer besonderen Anordnung bedarf, da der Kreis des Thermoelements von dem Stromleiter nicht zu stark einflußt wird, was durch Wenden der Stromrichtung geprüft wir Bei dem Thermogalvanometer DUDDELLS[22]) bildet ein kurzer platinie Quarzfaden den Hitzdraht, der gegen die Lötstelle eines Thermoelem strahlt, dessen Schenkel als Schleife in einem starken Magnetfelde hän Eine solche Übertragung verzögert die Wirkung und macht das Ins ment träge.

---

[20]) M. WIEN, Ann. Phys. 4, 425. 1901.
[21]) H. SCHERING, ZS. f. Instr. 1912, 69 u. 101
[22]) W. DUDDELL, Phil. Mag. 8, 97. 1904.

Neunzehntes Kapitel.

Spannung.

Als internationales Grundmaß der EMK gilt das WESTONsche Normalelement mit konzentrierter Cadmiumsulfatlösung, dessen Spannung $E = 1{,}0183 - 0{,}0_4 406\,(t-20) - 0{,}0_6 95\,(t-20)^2 + 0{,}0_7 1\,(t-20)^3$ Volt ist. Die gebräuchlichen Formen vertragen nur schwache Ströme und werden meistens im stromlosen Zustande zum Kompensieren der zu messenden Spannungen benutzt.

1. Spannungsquellen.

Spannungen werden heute im Laboratorium meist Bleiakkumulatoren entnommen, die sowohl wegen der Konstanz ihrer EMK als auch wegen ihrer starken Stromkapazität den früher gebräuchlichen Primärelementen weit überlegen sind. Bei der Ladung wird das Bleisulfat in Blei und Bleisuperoxyd verwandelt, die sich bei der Entladung zurückbilden nach der Formel $Pb + PbO_2 + 2\,H_2SO_4 = 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O$. Das spez. Gewicht der Säure, das etwa 1,2 beträgt, nimmt bei der Ladung um ungefähr 0,04 zu; die EMK beträgt 2,0 bis 2,2 Volt und wächst mit der Temperatur um 0,4%/Grad. Der innere Widerstand ist sehr gering.

Als Kapazität kann man auf eine Plattengröße von F dcm^2 etwa 4 F Amperestunden rechnen. Der sparsamen Verwendung wegen wird man eine Batterie von n Elementen so einrichten, daß diese in mehreren Gruppen — etwa zu $\frac{1}{2}$n und $\frac{1}{4}$n Elementen — parallel und in Reihe geschaltet werden können. Dieses ist wichtig sowohl für Batterien, die starke Ströme liefern sollen, als auch für kleine Zwergelemente, die man in großer Zahl zu Batterien von großer Spannung vereinigt. Diese müssen schon deshalb in Gruppen zerlegbar sein, weil sie nur so geladen und aufbewahrt werden können. Besondere Sorgfalt ist auf die Isolation zu verwenden, die man durch Holzgestelle, welche auf mit Öl gefüllten Porzellanfüßen stehen, zu erreichen sucht. Wo eine Wechselstromzentrale zur Verfügung steht, ladet man zweckmäßig mit Quecksilbergleichrichtern.

Von den Primärelementen sind zu erwähnen: DANIELL: — Zn, H_2SO_4, $CuSO_4$, Cu +; EMK = 1,1 V, wenig beeinflußt von Temperatur. BUNSEN oder GROVE: Zn, H_2SO_4 (spez. Gew. = 1,06), HNO_3 (konz.), C oder Pt; EMK = 1,9 V. LECLANCHÉ: Zn, NH_4Cl-Lösung, Braunstein, Kohle; EMK = 1,5 V, nimmt bei starker Stromentnahme schnell ab, besonders als Trockenelement gebraucht[1]).

Hohe Gleichstromspannungen werden außer durch die Batterien kleiner Akkumulatoren mit Hochspannungsmaschinen bis etwa 4000 V und mit Elektrisiermaschinen hervorgebracht. Influenzmaschinen von TÖPLER, WEHRSEN, WOMMELSDORF liefern Spannungen bis 50 000 V.

Bei Wechselspannungen spielt außer der Frequenz auch die Kurvenform eine Rolle. Die älteste Einrichtung zur Erzeugung von Sinusstrom ist der Sinusinduktor (KOHLRAUSCH 1874), bei welchem sich ein Dauermagnet in einer breiten Spule dreht. An die Stelle dieses Apparats sind später die Wechselstromsirenen[2]) getreten, bei denen ein eisernes Zahnrad vor den Polschuhen eines Elektromagnets rotiert und in deren Wicklungen Ströme induziert. Man erreicht eine Frequenz von 10 000. Die POULSEN-Lampe und die Elektronenröhren, welche ungedämpfte Schwingungen liefern, beherrschen das Gebiet der Hochfrequenz.

Viel benutzt werden Induktorien mit einfachem NEEFschen Platin- oder Quecksilberunterbrecher, obwohl der Strom von der Sinusform abweicht. Als Mittel zur Änderung der Frequenz dienen außerdem der Saiten-, der Quecksilber- und der WEHNELT-Unterbrecher. Der erste (M. WIEN 1891), der besonders für Messungen in Betracht kommt, besteht nach ABONS aus einer Kupfersaite, die zwischen den Polen eines Elektromagnets schwingt und durch die Verschiebung von Stegen und durch Veränderung der Spannung abgestimmt werden kann. Zwei Ströme fließen hindurch: der Betriebsstrom von 1 bis 2 A wird am linken U_1, der Arbeitsstrom, der durch die primäre Spule des Induktors J strömt, am rechten Quecksilbernapf U_2 unterbrochen (Fig. 139). Die erreichbare Frequenz beträgt 500[3]).

Fig. 139. Saitenunterbrecher.

Statt den Primärkreis des Induktors zu unterbrechen, kann man durch einen Mikrophonkontakt Änderungen des Widerstandes hervorrufen. Ein solcher Summer erzeugt nahezu Sinusstrom[4]).

Da der Saitenunterbrecher wegen der Quecksilberkontakte zu Störungen Anlaß gibt, wird vielfach ein rotierender Unterbrecher benutzt, dessen Drehzahl durch einen Tourenregler konstant gehalten wird. Nach GIBBS[5]) wird zu diesem Zweck senkrecht zur Welle eine Stange angeordnet, auf der ein durch zwei Federn gehaltenes Gewicht gleitet. Durch das Spiel zwischen Zentrifugalkraft und Elastizität der Federn wird ein Kontakt betätigt, mit dem im Erregerkreis des Elektromotors

[2]) M. WIEN, Ann. Phys. 4, 425. 1901; F. DOLEZALEK, ZS. f. Instr. 1903, 240.
[3]) E. ORLICH, ZS. f. Instr. 1904. 120.
[4]) M. GILDEMEISTER, ETZ 1920, 91.

ein Widerstand kurzgeschlossen wird, wodurch die Tourenzahl sinkt. Diese wird durch Auswechseln des Gewichts und der Feder eingestellt und kann auf lange Zeit innerhalb 0,1‰ gehalten werden.

Von der Umsetzung des Wechselstroms auf andere Spannung durch Transformatoren wird in der Meßkunde vielfach Gebrauch gemacht, um die Spannung den Meßgeräten anpassen zu können. Das Eisen dieser Meßwandler[6]), das meistens legiertes Dynamoblech ist, wird nur schwach gesättigt und die Streuung klein gehalten. Infolgedessen ist die primäre Spannung der sekundären nahezu proportional, es besteht nur eine geringe Abweichung von der Phasenverschiebung von 180° und Unabhängigkeit des Übersetzungsverhältnisses von der Frequenz.

2. Elektrometer.

Die Elektrometer beruhen auf der elektrostatischen Anziehung oder Abstoßung geladener Körper, die deshalb gut zu isolieren und gegen äußere Einflüsse abzuschirmen sind, wozu metallische Hüllen dienen, die mit der Erde leitend verbunden werden. Zur Isolierung eignen sich

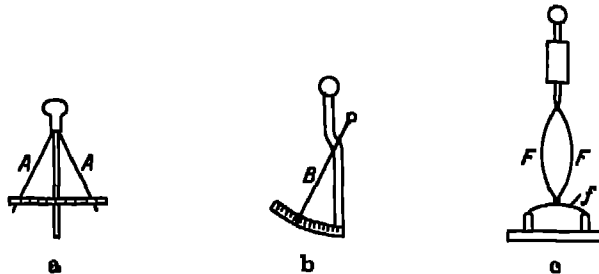



Fig. 140. Zweiblattelektrometer.

besonders Bernstein, Schwefel und Quarz. Die Ausschläge werden an Skalen mit bloßem Auge abgelesen oder mit dem Mikroskop beobachtet. Die zahlreichen verschiedenen Formen lassen sich nicht alle aufzählen; von den gebräuchlichsten werden einige Beispiele angegeben.

a) Blatt- und Fadenelektrometer. Auf der Abstoßung zweier gleichnamig geladener Leiter beruhen die Zweiblattinstrumente, die aus dem einfachen Goldblattelektroskop hervorgegangen sind. Die Bauart von Elster und Geitel[7]) hat als Gehäuse einen mit Glasplatten verschlossenen Metallzylinder, in dem an einem isolierenden Pfropfen zwei Aluminiumblättchen AA hängen (Fig. 140a), die in der Ruhelage durch zwei anzuschiebende Metallplatten an eine Mittelplatte gedrückt und

[6]) H. Schultze, ebd. 1911, 332; H. Schering u. E. Alberti, Arch. f. Elt. 2, 263. 1914.

auf diese Weise auf dem Transport geschützt werden können. Durch einen seitlichen Ansatz kann ein Trockenmittel (z. B. Natrium) eingeführt werden.

Das Elektrometer von F. BRAUN[8]), das für hohe Spannungen bestimmt ist, besitzt eine leichte Aluminiumnadel B, die sich um eine horizontale Achse dreht. In der Ruhelage liegt sie an einem senkrechten Metallbügel an, von dem sie bei der Ladung abgestoßen wird (Fig. 140b). Das Ganze ist von einer Blechhülle umschlossen, in der nur die Durchsicht für die quadrantenförmige Skale ausgespart ist.

WULF[9]) verwendet bei seinem Elektrometer zwei feine platinierte Quarzfäden FF, die einander nicht allein oben an der Aufhängung, sondern auch unten berühren und hier durch einen federnden Quarzfadenbügel f gehalten werden (Fig. 140c). Bei ihrer Ladung spreizen sich die Fäden in ihrer Mitte auseinander, und hier wird ihr Abstand durch ein Mikroskop mit Okularskale abgelesen. Die Empfindlichkeit läßt sich durch die Spannung der Fäden ändern. An jeder Seite befindet sich eine Schneide, die durch Influenz oder auch durch eine Hilfsspannung geladen und so eingestellt wird, daß die Fäden im Mikroskop immer deutlich sichtbar bleiben.

Um das Instrument von Temperatureinfluß frei zu machen, benutzt KOLHÖRSTER[10]) statt der geraden Quarzfäden gebogene Schlingen, deren Enden in geringer Entfernung voneinander an einem Metallblech befestigt werden, das in einen Isolator eingebettet wird. Die Ablesung mit dem Mikroskop, die an dem Scheitel der senkrecht stehenden Schlinge stattfindet, unterscheidet sich nicht von derjenigen gerader Fäden.

Das Einblattelektrometer, das BOHNENBERGER (1810) angab und HANKEL (1850) verbesserte, ist neuerdings als Saiteninstrument von WULF, von LUTZ[11]) sowie von ELSTER und GEITEL[12]) in seiner Empfindlichkeit verfeinert und in seiner Kapazität verkleinert (Fig. 141a). Die letztere ist auf 2 bis 8 · 10^{-4} μF herabgesetzt. LUTZ benutzt einen Platindraht von 2 μ Dicke und 6 cm Länge, der ebenfalls unten durch einen elastischen Quarzfaden f festgehalten und gespannt wird. Auf jeder Seite steht eine einstellbare Schneide S, die durch eine Hilfsspannung oder durch Influenz geladen wird. Die Schaltungen sind mannigfaltiger als bei dem einfachen Zweiblattinstrument. Ebenso die Empfindlichkeit, die sich durch die Änderung der Saitenspannung und

---

[8]) F. BRAUN, Wied. Ann. 31, 856. 1887 u. 44, 427. 1900.

[9]) TH. WULF, Phys. ZS. 1909, 251.

[10]) W. KOLHÖRSTER, ZS. f. Instr. 1924, 494.

[11]) C. W. LUTZ, Phys. ZS. 1923, 166.

des Schneidenabstandes variieren läßt, so daß Spannungen von 0,001 bis 100 Volt und mehr gemessen werden können. Bei dem Instrument von Elster und Geitel wird die Saite unten durch einen Spinnenfaden gehalten; für das Laden der Schneiden ist eine Trockenbatterie vorgesehen.

Das Kippelektrometer (Wilson 1903) besitzt ein Goldblatt G von 2 × 3 cm, das durch Schwefel isoliert in einem viereckigen Messingkasten K von 4 × 4 × 3 cm an einer Wand hängt, während an der gegenüberliegenden eine isolierte Messingscheibe M befestigt ist, die durch eine Batterie auf einer bestimmten Spannung gehalten wird. Die Neigung des Kastens ist durch Fußschrauben so einzustellen, daß das Goldblatt gerade umschlagen will Seine Ausschläge, die mit einem Mikroskop durch ein Glasfenster beobachtet werden, sind der angelegten Spannung nicht proportional (Fig. 141 b)[18].

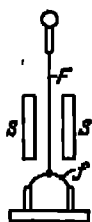
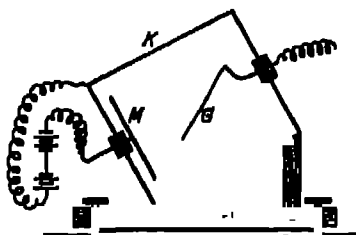
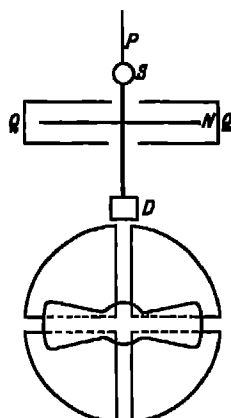



Fig 141 a. Einblattelektrometer. Fig. 141 b. Kippelektrometer. Fig 142. Quadrantenelektrometer.

b) Nadelelektrometer. Unter den Nadelelektrometern ist das Quadrantenelektrometer (W. Thomson 1860) das wichtigste. Seine biskuitförmige Nadel N aus dünnem Aluminiumblech schwebt in einer runden Schachtel aus Messingblech, die durch einen Kreuzschnitt in vier Quadranten QQ geteilt ist, von denen je zwei gegenüberliegende leitend miteinander verbunden sind (Fig. 142). Ein Schnitt der Schachtel fällt in die Mitte der Nadel, die an einem Platindraht P hängt und mit Spiegel S und Skale beobachtet wird. Die Isolatoren, auf denen die Quadranten stehen, sind durch Metallblech abgeschirmt, um das Kriechen der Nadel zu vermeiden. Man bringt am besten einen Luftdämpfer D an; das ältere Verfahren, zu diesem Zweck einen Teil der Aufhängung in Schwefelsäure zu tauchen, ist für feinere Messungen unzweckmäßig. Die Quadrantenflächen werden eben geschliffen. Läßt man die

---

18) G. W. Kaye, Phil. Trans. A 209, 123. 1908. — H. Schmidt, ZS. f. phys.

Schachtel am Rande offen, so kann man den Abstand der Nadel von Boden und Deckel der Quadranten regelbar einrichten. Das Instrument ist durch verschiedene Mäntel gegen Luftströmungen und Strahlung zu schützen[14]).

Man benutzt folgende Schaltungen:

1. Am meisten die Quadrantenschaltung, bei der das eine Quadrantenpaar mit dem Gehäuse geerdet, das andere auf das zu messende Potential V und die Nadel auf ein höheres Potential geladen wird.

2. Die Nadelschaltung, wo der Nadel das zu messende Potential mitgeteilt wird, während die Quadrantenpaare auf gleiches, aber entgegengesetztes Potential (durch eine in der Mitte geerdete Hilfsspannung) gebracht werden.

3. Die idiostatische oder Doppelschaltung, bei der das eine Quadrantenpaar auf das zu messende Potential geladen, das andere und die Nadel geerdet werden oder umgekehrt.

Im ersten Falle ist der Ausschlag φ der Nadel proportional V, ebenso im zweiten, während er im dritten proportional V^2 ist.

MAXWELL hat in seinem „Treatise of Electricity and Magnetism" (1873) für φ folgende Formel aufgestellt: $C\varphi = (V_1 - V_2)\{V_n - \frac{1}{2}(V_1 + V_2)\}$, wo C eine Konstante, V_n die Spannung zwischen Nadel und Gehäuse und V_1, V_2 die Spannungen zwischen den Quadrantenpaaren und dem Gehäuse bezeichnen. HALLWACHS (1886) hat die Formel erweitert, indem er auf die Kontaktpotentiale Rücksicht nahm und eine besondere Justierung des Instruments vorschrieb. GOUY (1888) wies darauf hin, daß in der MAXWELLschen Formel noch elektrostatische Kräfte vernachlässigt sind, die vom Ablenkungswinkel abhängen. Sie äußern sich in einer Änderung der Schwingungsdauer und wurden später von DEL PULGAR und WULF[15]) mit einem Fadenelektrometer nachgewiesen. ORLICH[16]) stellte mit Bezug darauf eine vollständigere Formel auf. Danach gilt:

$$D\varphi = a_0 V_n^2 + a_1 V_1^2 + a_2 V_2^2 + (a_2 - a_1) V_n (V_1 - V_2) + b V_1 V_2 + c_0 V_n + c (V_1 - V_2),$$

wo a, b, c Konstanten bedeuten, und wenn ebenfalls D_0, A und B Konstanten sind; es ist

$$D = D_0 + A (V_n - V_1)(V_n - V_2) + B (V_1 - V_2)^2.$$

Für die Quadrantenschaltung ist $V_2 = 0$ und V_n groß gegen V_1, so daß

$$D = D_0 + A V_n^2.$$

Für die Nadelschaltung $V_1 = -V_2 = V$, also

$$D = D_0 + A (V_n^2 - V^2) + 4 B V^2.$$

---

14) H. SCHULTZE, ZS. f. Instr. 1907, 65.

15) J. DEL PULGAR u. TH. WULF. Ann. Phys. 30. 697. 1909.

Für die idiostatische Schaltung ist $V_1 = V_n = 0$, also $D = D_0 + B V^2$. Die Konstanten a_0, a_1 .. lassen sich durch geeignetes Kommutieren eliminieren. ORLICH verwandte hierzu einen Umschalter mit 2×4 Näpfen, durch den die Quadrantenpaare und die Spannungen vertauscht werden können; die Näpfe N, G, Q_1, Q_2 führen zur Nadel, zum Gehäuse und zu den Quadrantenpaaren, B_1 und B_2 zur Hilfs- und der zu messenden Spannung Es werden alle vier Kombinationen der beiden Umschalter I und II gebildet: ‖ ‖, ‖ =, = =, = ‖. Fig. 143a zeigt die Verbindung bei der Quadrantenschaltung, Fig 143b die der idiostatischen Schaltung, die fur die Messung von Wechselspannungen wichtig ist. Man erhält dabei die Effektivwerte. Da die linearen Glieder wegfallen, braucht nur der Stromwender II umgelegt zu werden, so daß man mit zwei Ablesungen auskommt. Die mit Gleichstrom ausgeführte Eichung ist unmittelbar auf Wechselstrom anwendbar.

Fig. 143a. Quadrantenschaltung. Fig. 143b. Idiostatische Schaltung.

Die von dem Ausschlagswinkel abhängigen Glieder lassen sich durch eine sorgfältige Justierung des Instruments sehr klein machen. Es kommt darauf an, daß die Nadel sehr eben ist und sich genau um eine senkrechte Achse zwischen den horizontal gerichteten Quadrantenebenen dreht[17]).

DOLEZALEK[18]) stellte die Nadel aus Silberpapier her, indem er zwei aufeinandergelegte Lagen an den Rändern verklebte und dann in der Mitte auseinanderbog, so daß ein leichter Hohlkörper entstand, der keines besonderen Dämpfers mehr bedurfte. Der dünne Quarzfaden wurde durch Benetzung mit einer Lösung von Chlorcalcium oder einem anderen hygroskopischen Salz leitend gemacht. Für Wechselstrommessungen hat ein solcher Faden einen zu großen Widerstand und muß durch einen Platindraht ersetzt werden.

PASCHEN[19]) hat die Nadel sehr verkürzt: ein Kupferplättchen von 6 mm Breite, 0,01 mm Dicke und 12 mm Länge hing in Zylinderquadranten von 9 mm Durchmesser an einem Wollastondraht von 5 μ Stärke und 12 cm Länge. Bei einem Nadelpotential von 40 Volt beobachtete er in der Quadrantenschaltung für $1 \cdot 10^{-4}$ Volt einen Ausschlag von 1 mm bei 2 m Skalenabstand.

---

[17]) H. SCHULTZE, ZS. f. Instr. 1906, 147; H. SCHOLL, Phys. ZS. 1908, 915.

[18]) F. DOLEZALEK, ZS. f. Instr. 1901, 345 und 1906, 292; E. SCHREIBER, Ann. Phys. 59, 425. 1919.

Bei den Binantenelektrometern (CURIE 1886) ist die Schachtel in zwei Teile zerlegt, denen eine ebenfalls geteilte Nadel entspricht. Ihre Trennungslinie steht senkrecht auf derjenigen der Binanten. Die eine Nadelhälfte N_1 wird positiv geladen durch den als Aufhängung dienenden Platindraht, die andere N_2 negativ durch eine nach unten hängende Drahtspirale von einer Hilfsbatterie H, deren Mitte geerdet ist (Fig. 144). Ebenso wird der eine Binant B_2 geerdet, der andere B_1 mit der zu messenden Spannung V verbunden. Nadel und Schachtel sind nicht eben, sondern bilden flache Kugelschalen, damit die Nadel nicht an die Schachtel herangezogen wird. Für den Ausschlag erhält man $\varphi = C V_n (V_1 - V_2)$; er ist also der zu messenden Spannung proportional für beliebige Wertes von V_n. Diese Eigenschaft macht das Instrument für Zeigerablesung sehr geeignet; die Empfindlichkeit kann durch Variieren der Nadelspannung V_n in weiten Grenzen geändert werden[20])

c) Wageelektrometer. Die bisher beschriebenen Elektrometer bedürfen einer Eichung durch bekannte Spannungen; die Wageelektrometer lassen die Auswertung der anziehenden und abstoßenden Kräfte in absolutem Maße zu. Die Leiter werden wie ein Kondensator angeordnet, dessen eine Platte fest und dessen andere beweglich ist. Nun zieht eine große, mit der Dichte σ geladene ebene Platte die Einheit der Elektrizitätsmenge, die sich in einem gegen die Ausdehnung der Platte kleinen Abstand davor befindet, mit der Kraft $2\pi\sigma$ an. Denken wir uns vor der ausgedehnten, abgeleiteten Platte in geringerer Entfernung d eine kleine Platte F, die zum Potential V geladen ist, so bilden beide einen Kondensator von der Kapazität $F/(4\pi d)$ und der Ladung $FV/(4\pi d)$. Die entgegengesetzte Ladung der abgeleiteten Platte ist ebenso groß, und die Flächendichte ihrer Ladung beträgt $V/(4\pi d)$. Die Elektrizitätsmenge der kleinen Platte erfährt also eine Anziehung $P = 2\pi V/(4\pi d) \cdot FV/(4\pi d) = FV^2/(8\pi d^2)$. Diese Beziehung trifft umso genauer zu, je kleiner d gegen F ist. Dasselbe wird erreicht, wenn F mit einem Schutzring umgeben wird, der auch auf das Potential V geladen wird.

Bei dem absoluten Elektrometer von W. THOMSON (1860) schwebt die bewegliche, kleine Platte F, umgeben von einem Schutzring S, über einer ausgedehnten f an einer Federwage, die mit Gewichten belastet ist (Fig. 145). Wird F nun zum Potential V geladen und müssen alsdann, damit F seine Lage nicht ändert, m g an Gewichten abgenommen werden, so ist $V = d\sqrt{8 \cdot 981\,\pi m/F}$ (elst. CGS). Für F ist zu setzen $F = \frac{1}{2}\pi\left(r_1^2 + r_2^2 - b\,\frac{r_1 + r_2}{1 + \frac{\pi}{\ln 2}\frac{d}{r_2 - r_1}}\right)$, wo r_1 und r_2 die Halbmesser der

beweglichen Platte und des Ausschnitts im Schutzring, $r_2 - r_1$ die Breite der Fuge bedeuten[21]).

Bei der KIRCHHOFFschen Wage sitzt die bewegliche Platte an dem einen Balkenarm einer Hebelwage, die ebenso wie der Schutzring geerdet ist. Ihm gegenüber steht die isolierte Platte, deren Entfernung durch eine Schraube verstellt werden kann. Die zweite Wagschale wird mit Gewichten belastet.

Das Wageelektrometer ist vielfach zur Messung hoher Spannungen angewandt worden[22]). Statt die Wage hierbei mit Gewichten im Gleichgewicht zu halten, hat man nach dem Vorgang von CRÉMIEU (1904) der Anziehung der Kondensatorplatten durch die Abstoßung zwischen zwei Dynamometerspulen entgegengewirkt[23]). Die Isolation der Kondensatorplatten, die durch Büschelentladung und Funkenübergang bei den

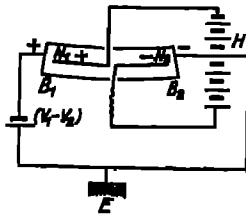



Fig. 144. Binantenelektrometer.

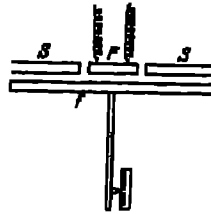



Fig. 145. Absolutes Elektrometer.

hohen Spannungen gefährdet ist, wird durch erhöhten Gasdruck aufrecht erhalten. Eine Stickstoffatmosphäre von 10 kg/cm² Druck hat eine Durchschlagsfestigkeit von 240 kV/cm, also mehr als gutes Transformatoröl. So hat z. B. TSCHERNYSHEFF[24]) eine Wage bis 180 000 Volt, PALM[25]) eine solche bis 300 000 Volt eingerichtet. Letzterer benutzt eine Doppelwage: jeder Wagearm trägt eine Kondensatorplatte und eine Stromspule, deren Wirkungen sich je addieren. Da die elektrostatische Anziehung proportional V^2, die elektrodynamische proportional I^2, so kann die Spannung V durch eine Stromstärke I gemessen werden, nachdem deren Wirkung durch Gewichte ausgewertet ist, was Vorteile bietet, weil man den Spannungsänderungen leichter durch Abgleichung einer Stromstärke, als eines Gewichtsatzes folgen kann. Die Kapazität solcher Instrumente ist klein ($10^{-5}\,\mu$F) und deshalb bei der Messung von Wechselstrom wenig von der Frequenz abhängig.

21) C. MAXWELL, Treatise of Electricity and Magnetism, §§ 217 und 218.
22) E. ABRAHAM u. J. LEMOINE, J. de phys. 4, 466. 1895.
23) C. MÜLLER, Ann. Phys. 28, 585. 1909.
24) A. TSCHERNYSCHEFF, Phys. ZS. 1910, 445.

d) Kapillarelektrometer. Bei elektrochemischen Arbeiten wir vielfach das Kapillarelektrometer (LIPPMANN 1873) benutzt. Es besitz keine kleine Kapazität und beruht auf der Tatsache, daß sich die Ober flächenspannung von Quecksilber in Schwefelsäure durch Polarisatio ändert. Das Elektrometer nach OSTWALD-LUTHER ist auf einem Bret befestigt, das durch eine Schraube in seiner Neigung verstellt werden kann wodurch sich die Kuppe des Quecksilberfadens in der 0,5 mm weite Kapillare verschiebt (Fig. 146 a) Die Oberfläche der zweiten Quecksilber elektrode ist groß, als Elektrolyt zwischen beiden befindet sich verdünnt Schwefelsäure. Man schließt zunächst kurz, reinigt die Kuppe in de Kapillare, indem man einige Tropfen Quecksilber überfließen läßt und stell

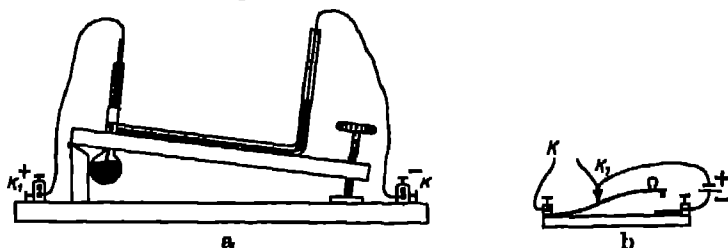



Fig. 146. Kapillarelektrometer.

sie ziemlich am Ende der unter der Kapillare befindlichen Millimete teilung ein. Die Empfindlichkeit wird durch die Neigung geregelt; ei Ausschlag von etwa 2 mm für 0,01 Volt ist passend. Die Kapillare i stets mit dem negativen Pol der zu messenden Spannung zu verbinder durch die entgegengesetzte Schaltung wird die Kuppe unbeweglich un muß durch Überfließen neu gereinigt werden. Unbenutzt soll d Elektrometer kurzgeschlossen sein, weshalb man den Stromschluss wie einen Morsetaster einrichtet, so daß der Kurzschluß nur währen der Beobachtung aufgehoben wird (Fig. 146b). Der Ausschlag ist d Spannung annähernd proportional und wird durch ein Element geeich Die zu messende Spannung darf 0,95 Volt nicht überschreiten, we hiermit ein Maximum der Oberflächenspannung erreicht wird. Vie fach dient das Instrument für Nullmethoden.

Bei anderen Formen wird die Quecksilberkuppe durch Luftdruc eingestellt und dieser als Maß für die Spannung beobachtet[26]).

3. Schlagweite.

Hohe Spannungen lassen sich nach der Schlagweite der Entladur in Luft schätzen. Man beobachtet meistens mit kugelförmigen Elel troden, deren Radius r groß ist gegen die Schlagweite a. Die Ve

zögerung, welche zwischen dem Anlegen der Spannung und dem Einsetzen des Funkens einzutreten pflegt, läßt sich durch Bestrahlung mit ultravioletten oder mit Röntgenstrahlen aufheben. Das Verfahren ist auch auf Wechselströme anwendbar und liefert den Scheitelwert der Spannung.

Die folgende Tabelle enthält die Werte der Entladungsspannung V in Kilovolt für zwei gleiche Kugeln vom Durchmesser d (cm) und für ebene Platten bei der Schlagweite a (cm) in Luft von 1 Atm. und 20°. Änderungen des Druckes und der Temperatur äußern sich proportional der entsprechenden Schwankung der Luftdichte einer Abnahme von 3° in der Temperatur und einer Zunahme von 8 mm Quecksilber im Druck entspricht je 1% in der Spannungssteigerung. Der Abstand der Zuleitungen von Erde oder sonstigen Gegenständen soll mindestens gleich dem fünffachen Kugeldurchmesser sein[27]).

Entladungsspannung (kV) für Schlagweiten a (cm) zwischen Kugeln vom Durchmesser d (cm) und zwischen ebenen Platten.

a \ d	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	25,0	Ebene Platten
0,05	2,0					2,05	2,05
0,1	5,0					4,60	4,5
0,2	8,7	8,5				8,0	8,0
0,3	12,0	11,8				11,3	11,3
0,4	15,0	14,0				14,4	14,4
0,5	17,0	17,9				17,4	17,4
0,6	20,6	20,9				20,4	20,3
0,7	23,3	23,7				23,2	23,2
0,8	25,6	26,5				26,1	26,1
0,9	27,7	29,0				28,0	28,0
1,0	29,5	32,0	32,4	32,1	31,8	31,7	31,7
2		52,1	59,3	60,0	60,0	59,0	59,6
3		64,2	80,7	85,4	86,2	87,0	87,0
4		71,0	97,7	108	110	114	114
5		76,8	111	128	133	140	140
10			150	200	222	260	266
15				241	282		

4. Kompensator.

Das Verfahren, die Spannung in geschlossenen Stromkreisen mit dem Kompensator zu messen, lehnt sich an eine von POGGENDORFF (1841) angegebene Schaltung. Die zu bestimmende Spannung E_x wird

[27]) W. O. SCHUMANN, Elektrische Durchbruch-Feldstärke von Gasen. Berlin

mit einem Galvanoskop G in den Nebenschluß zum Widerstande R gelegt, der mit einer größeren EMK E, dem Strommesser S und einem regelbaren Widerstand R_1 den Hauptkreis ausmacht (Fig. 147) Man regelt in diesem die Stromstärke I derart, daß G stromlos wird. Dann ist $E_x = IR$. Die Stromstärke I wird am Strommesser S abgelesen; zur Vereinfachung der Rechnung nimmt man für R eine runde Zahl, etwa 0,1 oder 1 Ohm[28]).

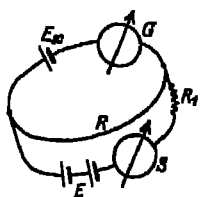



Fig. 147. Kompensationsschaltung von POGGENDORFF.

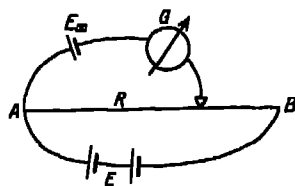



Fig. 148. Kompensationsschaltung von DU BOIS-REYMOND.

DU BOIS-REYMOND (1862) hat die Methode in der Weise abgeändert, daß er den Widerstand des Hauptkreises konstant hielt und nur den Widerstand R des Nebenschlusses änderte Dann brauchte er keinen Strommesser; es ist $E_x = CR$, die Konstante C wird dadurch bestimmt,

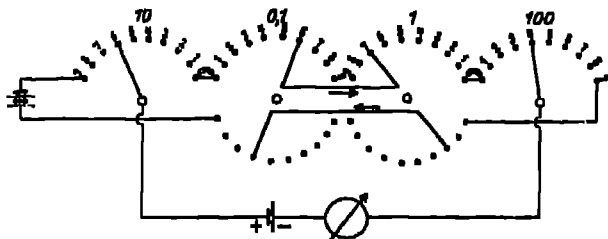



Fig. 149. FEUSSNERscher Kompensator.

daß man E_x mit einem Normalelement E_n vertauscht. Besonders einfach ist das Verfahren bei Verwendung einer Drahtbrücke AB mit Schleifkontakt (Fig. 148).

Der Kompensationsapparat von K. FEUSSNER (1890) beruht auf dieser Schaltung. Statt des Schleifdrahts AB wird ein in Dekader unterteilter Widerstand benutzt, dessen Teile durch Kurbeln abgegriffer werden. Einfach ist diese Einrichtung, wenn sie auf zwei Kurbelr beschränkt wird, da man hiermit die Einzelwiderstände von R ab schalten kann, ohne sie aus AB herausnehmen zu müssen. Bei der Ver mehrung der Dekaden muß man zwischen den beiden Endkurbelr

Doppelkurbeln anwenden, womit für die Widerstände, die man aus R herausnimmt, andere in den Hauptkreis eingeschaltet werden. Fig. 149 zeigt dies schematisch. Der Hauptkreis hat einen Widerstand von 999,9 Ohm, der aus neun Hundertern, neun Zehnern, neun Einern und neun Zehnteln besteht. Die Endkurbeln schleifen auf den Dekaden der Hunderte und Zehner, die nur einmal vorhanden sind, die Mittelkurbeln auf den Einern und Zehnteln, die doppelt so angeordnet sind, daß in den Hauptkreis eingeschaltet wird, was aus dem Nebenkreis herausfällt, der zwischen den beiden Endkurbeln liegt und in seinem Widerstand zwischen 0,1 und 999,9 Ohm geändert werden kann

In den Nebenkreis, der das Galvanometer enthält, wird zunächst das Normalelement eingeschaltet und die Stromstärke des Hauptkreises unter Benutzung eines Vorschaltwiderstandes z. B so abgeglichen, daß die Kurbeln auf den Kompensationswiderstand 101,8 Ohm stehen. Die Stromstärke würde alsdann 0,01 A betragen Eine solche Abgleichung auf einen runden Wert gewährt die Bequemlichkeit, daß die Spannungen ohne besondere Rechnung aus dem Stande der Kurbeln abgelesen werden können. Vorbedingung ist dabei eine genaue Abgleichung der Widerstände. Meistens werden Apparate mit fünf Kurbeln und Strömen von 0,01, 0,001 oder 0,0001 A benutzt.

Um die Konstanz des Stromes im Hauptkreis während der Beobachtung jederzeit schnell prüfen zu können, enthält er oft Widerstände von 101,8, 1018 und 10 180 Ohm, an denen das Normalelement immer liegen bleibt. Mit einem Umschalter wird das Galvanometer wahlweise in eine solche Abzweigung eingeschaltet.

Bei diesem Verfahren muß die zu messende Spannung kleiner sein als die Stromstärke des Hauptkreises, multipliziert mit dem gesamten Abzweigungswiderstand. Der Meßbereich kann daher durch Ändern dieser Stromstärke erweitert werden · nach unten bildet die Empfindlichkeit des Galvanometers die Grenze, nach oben die unzulässige Erwärmung der Widerstände. Hohe Spannungen hat man, wenn sie über den angegebenen Bereich hinausfielen, in den Hauptkreis verlegt und sie unmittelbar mit dem Normalelement kompensiert, das in die Abzweigung gelegt wurde wie bei der Abgleichung der Hilfsbatterie. Dabei war ein genau geeichter großer Vorschaltwiderstand erforderlich, weshalb man es später vorzog, die zu messende große Spannung durch einen Spannungsteiler auf den zehnten, hundertsten usw. Teil herabzusetzen und diesen mit dem Kompensationsapparat in dem Abzweigungskreise zu messen. Durch den großen Widerstand des Spannungsteilers wird die Spannung geschlossen, und von diesem Kreise wird dann in bekanntem Verhältnis abgezweigt[29]).

Die Aufgabe, den Widerstand des Hauptkreises konstant zu halten, ist noch auf mannigfach andere Art gelöst worden. Er besteht bei dem Apparat von RAPS[30]) aus je neun Zehnern und Tausendern, welche die Enddekaden bilden. An die einzelnen Widerstände dieser Dekaden werden mittels Doppelkurbeln K K' Nebenschlüsse gelegt, die aus je einer anderen Gruppe von Tausendern und Zehnern gebildet werden. Auf den Kontakten dieser Nebenschlußdekaden schleifen die Abzweigungskurbeln kk' für den Nebenkreis (Fig. 150).

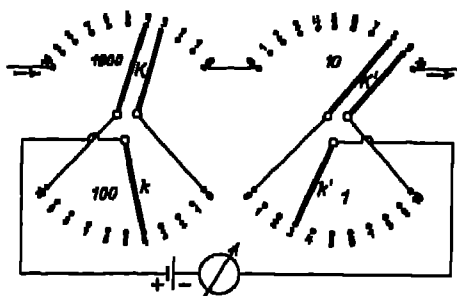



Fig. 150. RAPSscher Kompensator.

Legt man zu zwei Punkten eines Stromkreises, zwischen denen der Widerstand w liegt, einen Nebenschluß w_1 an, so sinkt die Spannung von E auf $E\,w_1/(w+w_1)$ und wenn $w_1 = n\,w_0$, auf $E\,n\,w_0/(w+n\,w_0)$. Am m ten dieser n gleichen Widerstände ist die Spannung $E_m\,w_0/(w+n\,w_0)$, im vorliegenden Falle $E_m = \frac{1000\,m\,E}{1000+9\cdot 1000} = \frac{m\,E}{10}$. Man erhält also mit der Kurbel k eine neue Dekade von Hunderten. Entsprechend liefert die Kurbel k' mit der anderen Dekade der Zehner die Einer. Weiter läßt sich das Schema nicht fortsetzen, so daß die Zehntel in eine Dekade verlegt werden, bei deren Schaltung sich der Widerstand des Hauptkreises etwas ändert. Dies ist ein geringer Übelstand; schwerer wiegt, daß sich der Widerstand des Nebenkreises und damit die Empfindlichkeit des Galvanometers bei der Schaltung unstetig ändert. Günstig ist dagegen die geringe Zahl der Widerstände.

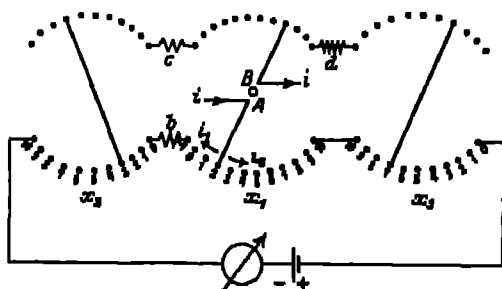



Fig. 151. DIESSELHORSTscher Kompensator.

Endlich sei noch eine Schaltung von DIESSELHORST[31]) beschrieben, der in Anlehnung an die von HAUSRATH und von WHITE[32]) vorgeschlagenen Anordnungen einen Kompensator für kleine Spannungen angegeben hat, bei dem im Galvanometerzweig Kurbelkontakte vermieden sind, da sie

---

30) A. RAPS, ZS. f. Instr. 1895, 215.

31) H. DIESSELHORST, ZS. f. Instr. 1908, 1.

bei kleinem Widerstand durch Thermokräfte und Übergangswiderstände stören.

Eine Ausführung mit drei Dekaden zeigt Fig. 151 schematisch. Der Hauptstrom tritt bei A ein, teilt sich am Knopf 2 der mittleren Dekade, die aus 11 Ohmstücken besteht, in die Zweige i_1 und i_2, die bei B wieder vereinigt austreten. Die beiden Stromzweige sind unabhängig von der Stellung der Doppelkurbeln, die auf der einen Seite ausschalten, was sie auf der anderen einschalten. Die äußeren Dekaden enthalten je 10 Stücke von 0,11 Ohm; ebenso ist $b = 0{,}11$, ferner $c = 80$ und $d = 910$, so daß $R_1 = 12{,}1 + 0{,}11 + 80 = 92{,}21$, $R_2 = 12{,}1 + 910 = 922{,}1$, also $R_2 = 10\,R_1$ und $i_1 = \frac{10}{11}\,i$, $i_2 = \frac{1}{11}\,i$. Bezeichnen V_{x1}, V_{x2} und V_{x3} die Spannungen an den Knöpfen x_1, x_2 und x_3, so erhält man.

$$V_{x1} - V_{x2} = \tfrac{10}{11}\,i\,(x_1 + 1 + b + 0{,}11\,x_2) = i\,(\tfrac{10}{11}\,x_1 + 0{,}1\,x_2 + \tfrac{10}{11} + 0{,}1),$$
$$V_{x1} - V_{x3} = \tfrac{1}{11}\,i\,\bigl((10 - x_1) + 0{,}11\,(10 - x_3)\bigr) = i\,(-\tfrac{1}{11}\,x_1 - 0{,}01\,x_3 + \tfrac{10}{11} + 0{,}1).$$

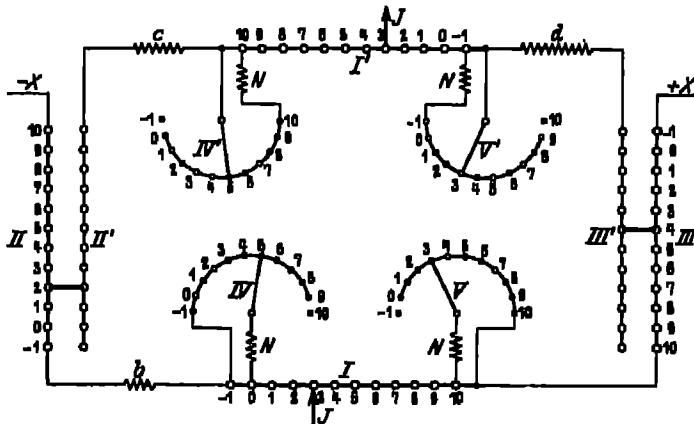



Fig. 152. Diesselhorstscher Kompensator.

Die Kompensationsspannung, die an zwei festen Punkten abgenommen wird, ist demnach $V_{x2} - V_{x3} = i\,(x_1 + 0{,}1\,x_2 + 0{,}01\,x_3)$.

Die Schaltung eines Apparates mit fünf Dekaden stellt Fig. 152 dar. Alle Widerstände sind wieder doppelt vorhanden, so daß durch Doppelkurbeln die eine Gruppe eingeschaltet wird, wenn man die andere ausschaltet. Alle reichen von -1 bis 10; auf diese Weise läßt sich prüfen, ob die Dekaden in richtigem Verhältnis stehen. Denn die Einstellung einer Dekade auf -1 und die der folgenden auf 10 müssen sich aufheben. In der ersten Dekade sind 11 Stücke von je 1 Ohm, in der zweiten und dritten je eben soviel von 0,11 Ohm vorhanden; sie entsprechen den Dekaden von 1, 0,1 und 0,01 Ohm, die vierte und fünfte Dekade,

0,0001 Ohm dar und haben als Grundwiderstände Stücke von 1 Ohm. Der Nebenschluß der Dekaden IV und V′ ist so zu bemessen, daß der Gesamtwiderstand 0,9989 — 0,0011 x Ohm beträgt, während er bei IV′ und V, wo die Bezifferung der Knöpfe in umgekehrter Reihenfolge

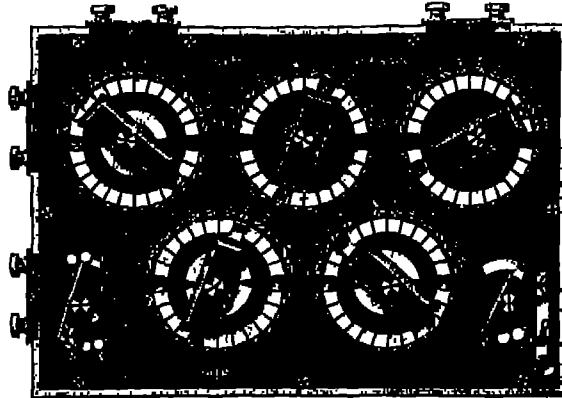



Fig. 153 a. DIESSELHORSTscher Kompensator.

umläuft, 0,9989 — 0,0011 x Ohm ist, wenn x die Einstellung bedeutet. Dabei muß $N = 81{,}64$ Ohm sein, $b = 0{,}111$ und ferner $d = 10\,c + 118{,}0$. Alsdann ist, wenn $x_1, x_2 \ldots$ die Stellung der Kurbeln und i die Gesamtstromstärke bedeutet: $E_x = i\,(x_1 + 0{,}1\,x_2 + 0{,}01\,x_3 + 0{,}001\,x_4 + 0{,}0001\,x_5)$. Macht man $c = 85{,}69$ und $d = 975{,}8$ Ohm, so beträgt der Gesamtwiderstand R 90 Ohm. Der Widerstand R_x des Kompensationskreises ist $14{,}35 - \frac{x_1^2}{R + R'}$, wo R′ den Ballastwiderstand bedeutet. Wählt man also R′ groß genug, so ist der Widerstand R_x nahezu konstant, so daß mit dem Ausschlag des Galvanometers noch eine Dezimale weiter gemessen werden kann.

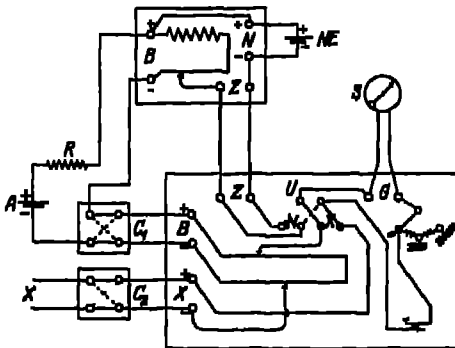



Fig. 153 b. DIESSELHORSTscher Kompensator.

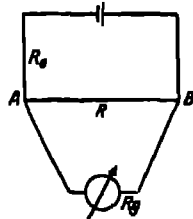
Fig. 153 a gibt eine Aufsicht auf den Apparat und Fig. 153 b eine Schaltungsskizze, in welcher der eigentliche Kompensator durch zwei Schleifdrähte angedeutet ist. Die Buchstaben haben in beiden Figuren dieselbe Bedeutung: das Galvanometer S wird an die Klemmen G angeschlossen, die zu messende Spannung an X und der Betriebsakku-

Widerstände von 101,83, 1018,3 Ohm, an denen das Normalelement NE kompensiert wird, einbezogen worden Der Umschalter U steht auf N oder X, je nachdem das Normalelement oder die Spannung X kompensiert werden soll. Die Stromwender C_1 und C_2 sind gleichzeitig umzulegen, sitzen also zweckmäßig auf derselben Achse Hiermit lassen sich die Thermokräfte in der Galvanometerleitung vermeiden, durch das Drehen der Kurbeln entstehen keine Thermokräfte; Voraussetzung ist dabei, daß die Strahlung der Hand (z. B am Galvanometerschlüssel) usw. abgeschirmt wird.

5. Spannungsmesser.

Spannungsmesser sind Stromzeiger (S. 227), deren Skale das Produkt aus Stromstärke und Widerstand, also die Spannung E zwischen zwei Punkten AB eines Stromkreises oder den Polen eines offenen Elements angibt, mit denen die Instrumente verbunden werden. Ist der Eigenwiderstand, der meistens hoch gewählt wird, gleich R_g und die Stromstärke I, so gilt $E = I\,R_g$. Durch Vorschalten von Widerständen 9 R_g, 99 R_g . . . wird der Skalenwert 10, 100 . . .mal größer Er wird mit dem Kompensator geprüft. Von der Temperatur sind die Spannungsmesser in den Grenzen ihrer Genauigkeit meistens unabhängig, da sie Vorschaltwiderstände aus Manganin enthalten.

Sind die sonstigen Widerstände des Stromkreises gegen den Widerstand R_g des Spannungsmessers nicht zu vernachlässigen, so ist, wenn E_0 die Spannung vor dem Anlegen des Spannungsmessers, an dem E abgelesen wird, $E_0 = E\left(1+\frac{1}{R_g}\frac{R_0 R}{R_0+R}\right)$, wo R den Widerstand zwischen den beiden Punkten AB und R_0 denjenigen des übrigen Stromkreises bezeichnet (Fig. 154)

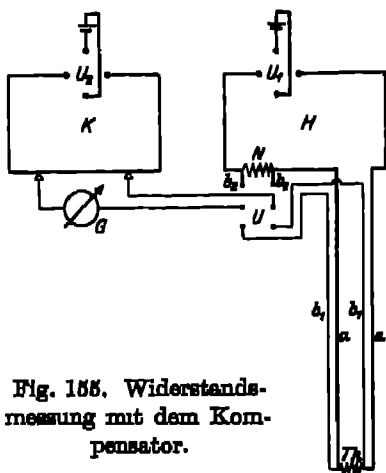
Fig. 154. Spannungsmesser.

Große Spannungen, die über die Skale eines vorhandenen Instruments hinausgehen, verkleinert man mit einem Spannungsteiler: man schließt sie durch den Widerstand R_t und zweigt nun von einem Teil R dieses Kreises ab; die Ablesung des Spannungsmessers ist dann mit R_t: R zu multiplizieren.

6. Messung von Stromstärke und Widerstand durch die Spannung.

Die Messung einer Stromstärke läßt sich auf diejenige einer Spannung zurückführen, wenn der Strom I einen Widerstand von bekanntem Betrage R durchfließt, an dessen Enden man die Spannung E bestimmt.

Die Spannung E wird je nach der gewünschten Genauigkeit entwede mit dem Kompensator oder mit einem Spannungsmesser ermittelt Den Meßwiderstand R, den man in den Stromkreis einschaltet, wir man bei starken Strömen, für welche das Verfahren besonders zweck mäßig ist, klein wählen, etwa 0,0001 oder 0,00001 Ohm, um mit weni Energie auszukommen. Ist der Meßwiderstand größer und mißt ma mit dem Spannungsmesser, so ist unter Umständen auch dessen Wider stand R_s zu berücksichtigen, und man erhält $I = \frac{E}{R}\left(1 + \frac{R}{R_s}\right)$.

Auch das Elektrometer läßt sich dabei zur Spannungsmessung benutzen Besonders bestimmt man damit kleine Stromstärken, indem man da Instrument an die Enden großer Wider stände legt. Als solche dienen Schich ten von ionisierter Luft oder zweck mäßiger von Flüssigkeiten, z. B. Man nit-Borsäurelösungen, welche eng Kapillaren ausfüllen[38]).

Fig. 155. Widerstandsmessung mit dem Kompensator.

Ferner werden geringe Stromstärke aus der Geschwindigkeit gemessen, mi der sie ein Elektrometer aufladen Steigt der Ausschlag eines Systems vo der Kapazität C in t Sekunden u E Volt, so ist $I = \frac{EC}{t}$. Auf die Weis lassen sich noch Stromstärken vo $1 \cdot 10^{-15}$ A und weniger messen. Di Genauigkeit wird begrenzt durch die Veränderlichkeit, welche di Elektrometerkapazität mit dem Wachsen des Ausschlags erleidet, un durch Unvollkommenheiten der Isolation.

Widerstände werden gemessen, indem man den unbekannten Wider stand und ein bekanntes Normal hintereinander in einen Stromkrei einschaltet und die Spannungen an ihren Enden miteinander vergleicht Besonders geeignet ist das Verfahren, wenn es sich um Widerständ handelt, die langer, veränderlicher Zuleitungen bedürfen, wie es bei de Widerstandsthermometern der Fall ist (Holborn und W. Wien 1895) die als Beispiel dienen mögen.

Der Thermometerwiderstand Th ist durch die langen Stromleitunge a_1a_1 mit dem Normal N zu dem Hauptkreise H verbunden (Fig. 155) Die Spannungsleitungen b_1b_1 führen ebenso wie diejenigen b_2b_2 de Normals zu dem Umschalter U, durch den sie wahlweise mit dem Gal-

vanometer G und dem Kompensator K verbunden werden können. Um die Wirkung von Thermoströmen zu eliminieren, ist der Strom in beiden Kreisen H und K zu wenden. Dies geschieht mit einem Griff, da die Quecksilbernäpfe der Umschalter U_1 und U_2 konzentrisch auf derselben Hartgummiplatte angeordnet werden. Beträgt der Abzweigungswiderstand am Kompensator R_{Th} oder R_N, je nachdem die Spannung am Widerstand Th oder N kompensiert wird, so ist $Th = NR_{Th}/R_N$ Da es nur auf das Verhältnis der Abzweigungswiderstände ankommt, ist die Abgleichung der Stromstärke im Kompensator auf einen runden Wert unnötig. Dagegen ist es für die Rechnung bequem, wenn R_N auf einen runden Wert gebracht wird.

Zwanzigstes Kapitel.

Elektrizitätsmenge.

Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist das Coulomb Mit dem Grammäquivalent wandert die Valenzladung F = 96 500 Coulomb, mit einem einwertigen Ion die Ladung (Elementarquantum) $e = 96\,500 \cdot 10^{-23}/6{,}06 = 1{,}59 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, da $6{,}06 \cdot 10^{23}$, die LOSCHMIDTsche Zahl, die Zahl der Atome im Mol, darstellt.

1. Ballistisches Galvanometer.

Die Elektrizitätsmenge Q, die ein Strom I in der Zeit t mit sich führt, wird dargestellt durch $\int_0^t I\,dt$ und kann unmittelbar mit dem Voltameter gemessen werden (S. 220) Ist die Dauer des Stromes kurz, so läßt sich die mitgeführte Menge durch den Ausschlag eines ballistischen Galvanometers messen. Voraussetzung ist, daß die Elektrizitätsmenge abläuft, bevor eine Verschiebung des schwingenden Systems eingetreten ist. Die Zeitdauer des ersten Ausschlags bis zur Umkehr soll nicht weniger als etwa 5 Sekunden betragen, damit der Umkehrpunkt scharf zu beobachten ist. Nötigenfalls kann zur Vergrößerung der Schwingungsdauer das Trägheitsmoment des Systems vergrößert werden, wenn es auf die Empfindlichkeit nicht ankommt.

Für die Bewegung eines Galvanometersystems gilt die Differentialgleichung $K\frac{d^2x}{dt^2} + p\frac{dx}{dt} + Dx = 0$, wo K Trägheitsmoment, p Dämpfungsmoment, D Direktionskraft, x Ausschlag und t Zeit bezeichnet. Als Anfangsbedingungen werden angenommen: für $t = 0$ $x = 0$ und $\frac{dx}{dt} = 0$.

Schwingt eine Magnetnadel vom Moment M in einem Felde $\mathfrak{H}$ un ist θ das Torsionsverhältnis der Aufhängung, so wäre $D = M\mathfrak{H}(1 + \theta$ Das Dämpfungsmoment p ist die Zahl, welche mit der Winkelgeschwindig keit v multipliziert das der Bewegung entgegenwirkende Drehmomen ergibt. Es ist $p = q^2/R$, wo q die dynamische Galvanometerkonstant (S. 221) und R den Widerstand des Galvanometerkreises (CGS) bedeute

Das Integral der Differentialgleichung ist $x = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}$, wo (und C_2 Konstanten, e die Basis der natürlichen Logarithmen, ferne α_1 und α_2 die Wurzeln der Gleichung $K\alpha^2 + p\alpha + D = 0$ sind, so da

$$\alpha = -\frac{p}{2K}\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4DK}{p^2}}\right).$$

a) Für $p < 2\sqrt{DK}$ erhält man den periodischen Zustand, für welche gilt $x = A \cdot e^{-\frac{\Lambda}{T}t} \sin\frac{\pi}{T}t$, hier bedeutet

$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{4DK - p^2}}, \quad \Lambda = \frac{pT}{2K} = \frac{\pi p}{\sqrt{4DK - p^2}} \text{ und } \frac{\Lambda}{T} = \frac{1}{2}\frac{p}{K}.$$

Das System macht Schwingungen, deren (halbe) Periode gleich T i und deren Amplitude in geometrischer Reihe abnimmt. Das Dämpfung verhältnis, also das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Schwi gungen, sei mit k bezeichnet. Dann ist $\Lambda = \ln k$ das natürliche log rithmische Dekrement. Für $p = 0$, also für die ungedämpften Schwi gungen, ist die halbe Periode

$$T_0 = \pi\sqrt{K/D}; \quad T/T_0 = \sqrt{\Lambda^2 + \pi^2}/\pi. \quad \text{Ferner ist}$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{A}{T}e^{-\frac{\Lambda}{T}t}\left(\pi\cos\frac{\pi}{T}t - \Lambda\sin\frac{\pi}{T}t\right).$$

Die Geschwindigkeit an der Stelle der Ruhelage beträgt danach fi

$$t = 0: v_0 = \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 = A\frac{\pi}{T}; \text{ für } t = T: v_T = -\left(\frac{dx}{dt}\right)_T = A\frac{\pi}{kT}.$$

Die erste Umkehr, wo $dx/dt = 0$, falle auf die Zeit t_1; für diese gilt:

$$\operatorname{tg}\frac{\pi}{T}t_1 = \frac{\pi}{\Lambda} \text{ oder } t_1 = \frac{T}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\Lambda} \text{ und } \sin\frac{\pi}{T}t_1 = \frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}},$$

und für den ersten Ausschlag x_1 folgt:

$$x_1 = \frac{v_0 T}{\pi}k^{-\frac{1}{\pi}\cdot\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\Lambda}} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}} = \frac{v_0 T_0}{\pi}k^{-\frac{1}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\Lambda}}$$

$$\text{und} \quad v_0 = \frac{\pi}{T_0}x_1 \cdot k^{\frac{1}{\pi}\operatorname{arc\,tg}\frac{\pi}{\Lambda}}.$$

b) Für $p^2 = 4KD$, den Grenzfall des aperiodischen Zustandes, wird d

[illegible]

Ferner ist $t_1 = \frac{T_0}{\pi} = \sqrt{\frac{K}{D}}$, $x_1 = \frac{v_0 T_0}{\pi e} = \frac{v_0}{e}\sqrt{\frac{K}{D}}$. Das System schwingt aus der Ruhelage und nähert sich dieser nach der Umkehr wieder gemäß einer e-Funktion. Die Zeit, die verfließt, bis die Ruhelage praktisch wiederhergestellt und das Instrument zu einer neuen Beobachtung bereit ist, ist nahezu ein Minimum[1]), die Empfindlichkeit ein Maximum. Zur Zeit $t_1 + t'$ geht der Ausschlag x_1 auf einen Bruchteil $1/n$ zurück, der durch die Gleichung gegeben ist: $\frac{1}{n} = e^{-\frac{\pi}{T_0}t'}\left(1 + \frac{\pi}{T_0}t'\right)$,

z. B. besteht nach $\frac{t'}{T_0}$ = 2,1   2,9   3,7
noch 1   0,1   0,01 % des Ausschlags x_1.

c) Für $p^2 > 4\,KD$ verläuft die Bewegung aperiodisch und wird dargestellt durch die Gleichung $x = \frac{v_0}{2\nu} e^{-\mu t}(e^{\nu t} - e^{-\nu t})$, wo

$$\mu = \frac{p}{2K} \text{ und } \nu = \frac{\sqrt{p^2 - 4KD}}{2K}.$$

Für die Umkehr ergibt sich

$$t_1 = \frac{1}{2\nu} \ln \frac{\mu+\nu}{\mu-\nu}; \quad x_1 = \frac{v_0}{2\nu}\left(\frac{\mu+\nu}{\mu-\nu}\right)^{-\frac{\mu}{2\nu}} \left\{\left(\frac{\mu+\nu}{\mu-\nu}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\mu+\nu}{\mu-\nu}\right)^{-\frac{1}{2}}\right\}.$$

Zur Zeit t' nach der Umkehr besteht noch $1/n$ des Ausschlags, wo

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2\nu} e^{-\mu t'}\{(\mu+\nu)e^{\nu t'} - (\mu-\nu)e^{-\nu t'}\}.$$

Wächst p so weit, daß sich μ und ν wenig unterscheiden und $\mu - \nu \sim D/p$, so kommt $1/n = e^{(\nu-\mu)t'}$; je kleiner $(\nu - \mu)$ ist, desto langsamer kriecht das System.

2. Zeitintegral der EMK.

Wird ein schnell verlaufender Stromstoß $\int i\,dt = Q$ oder das Zeitintegral einer EMK z. B. von einer Induktionsspule durch ein ungedämpftes Galvanometer entladen, so wird dem schwingenden System, dessen (halbe) Schwingungsdauer T_0 sei, eine Winkelgeschwindigkeit v_0 erteilt, die gegeben ist durch $v_0 = \frac{q}{K} Q = \frac{\pi^2 Q}{C T_0^2}$, wenn q die dynamische Galvanometerkonstante, C den Reduktionsfaktor des Instruments und K das Trägheitsmoment des Systems bezeichnet (vgl. S. 222). Andererseits ist nach S. 252 $v_0 = \frac{\pi}{T_0} x_1$, wo x_1 den ersten Ausschlag bedeutet. Daraus folgt für die Elektrizitätsmenge: $Q = \frac{C T_0}{\pi} x_1 = \mathfrak{C} x_1$. $\mathfrak{C}$ heißt wohl der ballistische Reduktionsfaktor des Galvanometers.

Beobachtet man in dem geschlossenen Kreise eines gedämpften Galvano meters, so lautet die Gleichung, wenn T die Schwingungsdauer bc dem Dämpfungsverhältnis k bezeichnet,

$$Q = \frac{CT_0}{\pi} k^{1/\pi \cdot \operatorname{arc\,tg} \pi/\Lambda} \cdot x_1 = \frac{CT}{\sqrt{\pi^2 + \Lambda^2}} k^{1/\pi \cdot \operatorname{arc\,tg} \pi/\Lambda} \cdot x_1,$$

die im aperiodischen Grenzfall übergeht in $Q = \frac{CT_0}{\pi} e x_1$.

Die Größe Q erhält man in Coulomb, wenn dem Reduktionsfakto C als Einheit Ampere zugrunde gelegt ist. Zur Bestimmung de Dämpfungsverhältnisses k werden Schwingungen erregt und derei Umkehrpunkte u beobachtet Der Unterschied zweier aufeinander folgender liefert die Anzahl s der Skalenteile, die vermindert um $\frac{1}{3} s^3/A$ dem Bogen a entspricht Ist a_m der mte, a_n der nte Bogen, so ist

$k = \left(\frac{a_m}{a_n}\right)^{\frac{1}{m-n}}$ oder $\lambda = \log k = \frac{\Lambda}{2{,}3026} = \frac{\log a_m - \log a_n}{m - n}$. Die Ruhe lage u_0 ergibt sich aus zwei Umkehrpunkten u_1 und u_2 zu $u_0 = u_2 + \frac{u_1 - u_2}{1 + k}$

In der folgenden Tabelle sind einige Werte für den Exponentialfaktor der Formeln angegeben.

Gedämpfte Schwingungen.

$\lambda = \log k$	$\Lambda = \ln k$	k	$\sqrt{1 + \frac{\Lambda^2}{\pi^2}}$	$k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\Lambda}}$
0,00	0	1,000	1,0000	1,0000
0,05	0,1151	1,122	0007	0578
0,10	2303	1,250	0027	1100
0,15	3454	1,413	0060	1743
0,20	4605	1,585	0107	2324
0,25	5756	1,778	0107	2900
0,30	6908	1,905	0239	3400
0,35	8059	2,239	0324	4020
0,40	9210	2,512	0421	4578
0,50	1,1513	3,162	0650	5035
0,60	1,3816	3,981	0924	6030
0,70	1,6118	5,012	1230	7554
0,80	1,8421	6,310	1592	8406
0,90	2,0723	7,943	1980	9185
1,00	2,3026	10,00	2396	9892
1,5	3,4539	31,62	4862	2,2512
2,0	4,6052	100,0	7745	4050
2,5	5,7565	316,2	2,0875	4978
3,0	6,9078	1 000	2,4155	5502
4,0	9,2103	10 000	3,0976	6214
5,0	11,513	100 000	3,7087	6544
10,0	23,026	10^{10}	7,3972	7015

Dauert der Stromstoß eine Zeit τ an, die gegenuber der Schwingungsdauer T_0 nicht klein ist, so hat man den Ausschlag x_1 durch $(1 - f\tau^2/T_0^2)$ zu dividieren, um den für den momentanen Stoß gültigen zu erhalten, f hängt von der Stromkurve ab und ist für konstanten Strom $= 0{,}4$[2])

Selbstverständlich läßt sich der ballistische Reduktionsfaktor $\mathfrak{C}$ auch dadurch bestimmen, daß man eine bekannte Elektrizitätsmenge Q durch das Galvanometer entlädt. Gewöhnlich benutzt man zu diesem Zweck das Zeitintegral einer EMK, wie es bei dem Entstehen, Verschwinden oder Umkehren eines magnetischen Feldes in einer Induktionsspule beobachtet wird. Wir werden hierfür noch Beispiele bringen.

Ruft das Integral in dem Galvanometerkreis vom Widerstande R den Ausschlag x_1 hervor, so ist $\frac{1}{R x_1}\int E\,dt = \mathfrak{C} \cdot k^{1/\pi \cdot \mathrm{arc\,tg}\,\pi/\Lambda}$.

Wird derselbe Stromstoß, der die Elektrizitätsmenge Q mit sich führt, in regelmäßiger schneller Folge wiederholt, etwa n mal in 1^s, so entsteht eine dauernde Ablenkung x, und es ist $Q = C\,x/n$.

Um den ballistischen Ausschlag zu vergrößern, kann man den Stromstoß wiederholen, und zwar jedesmal dann, wenn das gedämpfte System durch die Ruhelage geht. In dieser erfolgt der erste Stoß, der zweite in entgegengesetzter Richtung, wenn das System zurückkehrt usw., bis nach einiger Zeit der Ausschlag einen Grenzwert x_g erreicht. Für den ersten Ausschlag x_1 gilt alsdann $x_1 = \frac{1}{2} x_g (k - 1)/k$. Kommt es nur auf den Vergleich verschiedener Elektrizitätsmengen an, so braucht man nicht den Grenzwert zu erreichen, sondern nur jedesmal dieselbe Anzahl von Stößen zu erteilen; die Summe einer gleichen Anzahl von Ausschlägen ist der Elektrizitätsmenge proportional. Außer diesem Multiplikationsverfahren hat W. Weber (1846) noch die Zurückwerfungsmethode ausgebildet, auf welche hier nur hingewiesen sei.

3. Kurze Zeiten.

Hat man ein ballistisches Galvanometer auf Elektrizitätsmengen Q geeicht, so lassen sich damit nach Pouillet (1844) kurze Zeiten messen. Wird nämlich ein Stromkreis, in welchen das Galvanometer eingeschaltet ist, z. B. durch einen Pendelunterbrecher (S. 52) zur Zeit $t = 0$ geschlossen und nach Ablauf von t Sekunden geöffnet, so ist $t = \frac{QR}{E}$, wenn der Kreis die konstante EMK E und den Widerstand R enthält.

Helmholtz (1851) hat auf den Einfluß hingewiesen, den das allmähliche Ansteigen der Stromstärke nach der Schließung auf die Messung ausübt und der sich besonders bei großer Induktivität und kleinem

Widerstand des Stromkreises bemerkbar macht. Es ist deshalb no wendig, die Anstiegzeit durch Einschalten von induktionsfreiem Wide stand unter Verstärkung der EMK zu verkleinern oder sie dadurch z eliminieren, daß das Galvanometer einen Nebenschluß erhält (Fig 156

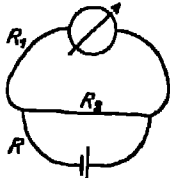



Fig. 156. Messung kurzer Zeiten.

R, R_1 und R_2 seien die Widerstände des Batterie des Galvanometer- und des Nebenzweiges, R und I werden als induktionsfrei angenommen. Der Stro wird durch einen Kontakt in R zur Zeit $t = 0$ g schlossen und nach t Sekunden entweder in R oder i R_1 geöffnet, nachdem inzwischen der zweite Konta durch einen Kommutator von R nach R_1 umgeschalt ist. Im ersten Falle kann sich der Extrastrom, d durch die Induktivität L des Galvanometers bestimn werde, entladen, im zweiten nicht.

Nach den KIRCHHOFFschen Regeln ergeben sich folgende Gleichunge

$$I = I_1 + I_2;\; E - IR = I_2 R_2 = I_1 R_1 + L\, dI_1/dt \text{ oder}$$

$$I_1 \{R(R_1 + R_2) + R_1 R_2\} = E R_2 - (R + R_2) L\, dI_1/dt.$$

Wird nun R_1 zur Zeit t unterbrochen, wo $I_1 = I_t$ sei, so ist

$$Q = \int_0^t I_1\, dt = \frac{E R_2 t - (R + R_2) L I_t}{R(R_1 + R_2) + R_1 R_2}.$$ Wenn R unterbrochen wir so ist die Elektrizitätsmenge Q' größer als vorher, und zwar u $Q' - Q = L I_t/(R_1 + R_2)$, so daß $t = \frac{1}{E R_2}\{Q'(R + R_2)(R_1 + R_2) - Q R_2^2$

Q und Q' ergeben sich aus den Ausschlägen des ballistischen Galvan meters.

Einundzwanzigstes Kapitel.

Kapazität.

Die Einheit der Kapazität ist das Farad. Da sie sich für die meist Angaben als zu groß erweist, erfolgen diese in Mikrofarad $= 10^{-6}$ Vielfach wird noch benutzt die elst. Einheit, das Zentimeter:

$$1 \text{ cm} = \tfrac{1}{9} \cdot 10^{-6}\,\mu F.$$

1. Kondensatoren.

Für einige oft gebrauchte einfache Formen gelten folgende in el CGS berechneten Ausdrücke:

Die Kapazität der Kugel vom Radius r ist $C = r$, und für einen g raden Draht von der Länge l und der Dicke d (abgeleitet als Grenzf des Rotationsellipsoids) erhält man: $1/C = \frac{2}{l} \ln \frac{2l}{d}$. Für die Kapazit

des KOHLRAUSCHschen Kondensators, der aus zwei kreisförmigen Platten vom Radius r und der Dicke d besteht, deren Abstand a beliebig eingestellt werden kann, gilt nach KIRCHHOFF:

$$C = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi}\left[\ln\frac{16\pi r}{a} + 1 + f\left(\frac{d}{a}\right)\right]$$

und für drei Kreisplatten, von denen die beiden äußeren geerdet, nach GRÜNEISEN und GIEBE:

$$C = \frac{r^2}{2a} + \frac{r}{\pi}\left[1{,}1078 + \frac{2}{3}f\left(\frac{2d}{a}\right)\right].$$

Für unendlich dünne Platten wird das letzte Glied in der Klammer Null; sonst hat die Funktion f die Form: $f(x) = (1 + x)\ln(1 + x) - x\ln x$. Der Schutzringkondensator besteht aus einer kreisförmigen Platte vom Radius r, die von einem Schutzring vom inneren Radius r′ umgeben ist, so daß $r' - r = b$ die Furchenbreite bedeutet. Beide sind auf dasselbe Potential geladen; ihnen steht eine große, abgeleitete Platte gegenüber. Dafür gilt nach KIRCHHOFF:

$$C = \frac{(r + r')^2}{16a} - \frac{r + r'}{2\pi}(\beta \operatorname{tg}\beta + \ln\cos\beta),$$

wo $\beta = \operatorname{arc}\operatorname{tg}\frac{1}{2}b/a$, wenn b klein gegen die Plattendicke ist.

Für einen Zylinderkondensator von der Länge l, dem inneren Radius r und dem äußeren $r + a$ erhält man für den inneren Zylinder, wenn l groß gegen r, $C = \frac{l}{2}\frac{1}{\ln(1 + a/r)}$; ist a klein gegen r, so vereinfacht sich die Beziehung zu $C = \frac{1}{2}l\,r/a$.

Die Luftkondensatoren, welche als Grundmaße dienen, sind schon behandelt (S. 207). Eine zweckmäßige Form für kleinere Beträge[1]), wo die Zuleitungen merklich werden, zeigt Fig. 157. von den beiden Systemen horizontaler kreisförmiger Platten ist das eine mit dem Gehäuse verbunden, während das andere isolierte oben und unten einen Kontakt trägt, der unten als Stift aus dem Gehäuseboden herausragt und durch ein Loch im Deckel eines tiefer stehenden Kondensators die federnde Verbindung mit diesem herstellt, wenn mehrere zur Parallelschaltung aufeinander gestellt werden. Für den untersten ist ein einfacher Teller mit isoliertem Kontakt vorgesehen, von wo ein Draht seitlich nach außen führt. Ob ein Kondensator auf einen anderen oder auf den Teller gesetzt wird, stets erfährt also seine Kapazität die gleiche Zunahme, so daß sich die Summe leicht angeben läßt.

Diese Kondensatoren, die im Werte von 0,005, 0,002 und 0,001 μF hergestellt wurden, glich man dadurch ab, daß eine Platte zwei segment-

artige Ausschnitte erhielt, die durch drehbare ähnliche Scheiben mehr oder weniger geschlossen werden konnten.

Als Kapazität, die stetig zu verändern ist, werden Drehkondensatoren benutzt, entweder allein oder in Parallelschaltung zu einem größeren Satz von Kondensatoren. Der Drehkondensator besteht aus zwei Systemen halbkreisförmiger Platten, wovon das eine a fest, das andere b um eine senkrechte Achse drehbar ist und verschieden weit zwischen die festen Platten geschoben werden kann. Die Stellung des beweglichen Systems wird an einem über einer Teilung angebrachten Zeiger Z abgelesen (Fig. 158).

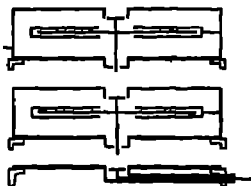



Fig. 157. Luftkondensator.

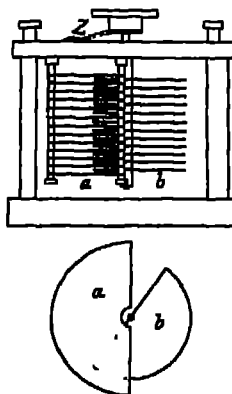



Fig. 158. Drehkondensator.

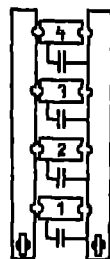



Fig. 159. Stöpselkondensator.

Wählt man statt Luft eine Flüssigkeit oder einen festen Körper als Dielektrikum, so ist die Kapazität des Kondensators mehr oder weniger von dem Meßverfahren abhängig und wird am zweckmäßigsten mit derjenigen Stromart geeicht, mit der sie gebraucht werden soll. Am günstigsten verhält sich Glimmer, den man deshalb mit Vorteil für die Sätze von Kapazitäten verwendet, die ähnlich wie die Widerstände in Kästen untergebracht und mit Stöpseln oder Kurbeln geschaltet werden (Fig. 159). Um die Randwirkungen zu vermeiden, wird das Dielektrikum ganz in das Metall eingehüllt. Die Glimmerkondensatoren haben einen Temperaturkoeffizienten von etwa 0,5‰/Grad, also mehr als das Zehnfache desjenigen der Luftkondensatoren. Mit zunehmender Frequenz des Wechselstroms nimmt die Kapazität erst schnell, dann langsamer ab.

2. Absolute Messung der Kapazität.

Das Grundmaß der Kapazität ist wie dasjenige der Spannung ein abgeleitetes und gründet sich, da $[C] = \left[\frac{Q}{E}\right] = \left[\frac{I\,t}{I\,R}\right] = \left[\frac{t}{R}\right] = \frac{\text{sec}}{\text{Ohm}} = $ Farad

und Ohm. Für die Ableitung der Kapazität aus diesen Einheiten hat MAXWELL ein Meßverfahren angegeben[2]), das vielfach benutzt worden ist[3]), weil es eine große Genauigkeit gewährt. Es beruht darauf, daß sich ein Kondensator, der schnell abwechselnd geladen und entladen wird, ähnlich wie ein Widerstand verhält.

Denn schaltet man in den Stromkreis einer Batterie E den Kondensator von der Kapazität C und einen Umschalter ein, der ihn andauernd n- mal in der Sekunde lädt und durch Kurzschluß entlädt, so fließt bei jeder Ladung die Elektrizitätsmenge $Q = CE$, also bei n Ladungen in der Sekunde der mittlere Strom $\overline{I} = n\,CE$. Ein gleicher Strom würde entstehen, wenn man statt Kondensator und Umschalter einen Widerstand $R = 1/nC$ einschaltete. Wird der Kondensator über einen Widerstand R_0 aufgeladen, so hat der Ladestrom, solange die Ladung vollständig erfolgt, denselben Wert $\overline{I} = n\,CE$, der Ersatzwiderstand hat jedoch, da R_0 bei der Abschaltung von Kondensator und Umschalter an seiner Stelle bleibt, jetzt den Wert $1/nC - R_0$.

Fig. 160. Absolute Messung der Kapazität.

Bei dem MAXWELLschen Verfahren wird der Kondensator nebst Unterbrecher in einen Zweig einer WHEATSTONEschen Brücke eingeschaltet. Ist R_0 der Verzweigungswiderstand des ganzen Systems zwischen den Punkten A und B (Fig. 160), so wird der Kondensator durch den Widerstand $R_4 = 1/nC - R_0$ zu ersetzen sein. Verschwindet der Strom in der Brücke, so ist $R_4 = \frac{1}{nC} - R_0 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$, woraus folgt:

$$C = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{\frac{R_2 R_3}{R_1} + R_0} = \frac{1}{n} \cdot \frac{R_1}{R_2 R_3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_0 R_1}{R_2 R_3}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{R_1}{R_2 R_3} \cdot F.$$

R_0 und F sind abhängig von R_1, R_2 und R_3 sowie von den Widerständen R_G und R_B des Galvanometer- und Batteriekreises, und zwar ergibt sich nach J. J. THOMSON:

$$F = \frac{1 - \frac{R_1^2}{(R_1 + R_2 + R_B)(R_1 + R_3 + R_G)}}{\left[1 + \frac{R_1 R_B}{R_3 (R_1 + R_2 + R_B)}\right]\left[1 + \frac{R_1 R_G}{R_2 (R_1 + R_3 + R_G)}\right]}.$$

C ist in Farad zu messen. Daher ist $1/nC$ sehr groß und R_0 klein dagegen, so daß F nicht sehr von 1 verschieden ist und nur einen Korrek-

[2]) H. DIESSELHORST, Ann. Phys. 19, 382, 1906.

[3]) E. B. ROSA und F. W. GROVER, Bull. Bur. Stand. 1, 153, 1905; E. B. ROSA

tionsfaktor darstellt In erster Annäherung ist $R_0 \sim R_1 + R_G$, wenn R_2 und R_3 groß und R_B nahezu Null. Man nimmt deshalb ein Galvanometer von kleinem Widerstand und wählt R_1 klein gegen $1/nC$, R_2 viel größer als R_1, also etwa $R_1/R_2 = 1 . 10$ oder $1 \cdot 100$.

Das Verfahren ist unabhängig von Kapazität und Selbstinduktion in den Zweigen R_1, R_2 und R_3, da diese die Aufladung nur verzögern können. Man muß sich also noch vergewissern, ob diese vollständig während der Dauer t des Stromschlusses erfolgt. Zur Zeit t nach Beginn der Ladung wird die Spannung E_t dargestellt durch $E_t = E\left(1 - e^{-\frac{t}{R_0 C}}\right)$. Da die Kontaktdauer t klein, R_0 und C groß sind, so läßt sich auch schreiben $C\left(1 - e^{-\frac{t}{R_0 C}}\right) = \frac{1}{n}\frac{R_1}{R_2 R_3} F$, und setzt man in der Klammer Näherungswerte ein, und zwar

$$C = \frac{1}{n} \cdot \frac{R_1}{R_2 R_3} F \text{ und } R_0 = \frac{R_2 R_3}{R_1}\left(\frac{1}{F} - 1\right), \text{ so kommt: } C = \frac{\frac{1}{n} \cdot \frac{R_1}{R_2 R_3} F}{1 - e^{-\frac{t}{T} \cdot \frac{1}{1-F}}},$$

wo $T = 1/n$ die Periode und t/T das Verhältnis der Kontaktdauer zur Periode.

GIEBE benutzte einen rotierenden Unterbrecher (S. 234), für den $n = 180$/sec war. Die zu messenden Kondensatoren hatten eine Kapazität von 0,01 und 0,02 μF, so daß $1/nC = 555\,000$ und $185\,000$ Ohm betrug Für solche Widerstände ist natürlich eine gute Isolation erforderlich, die bei einer dichten Anordnung der Kondensatorplatten nur mit Trockenmitteln zu erreichen ist.

Statt der Brücke kann auch das Differentialgalvanometer benutzt werden [HIMSTEDT 1886[4])]. Der Kondensator wird durch eine Wicklungshälfte des Galvanometers entladen, während die andere den konstanten Strom aus der Batterie E empfängt. Das Galvanometer ist so abzugleichen, daß es keinen Ausschlag zeigt, wenn durch beide gegeneinander geschaltete Spulen derselbe Strom fließt. In dem einen G_1, der ein Widerstand R_3 vorgeschaltet ist, ist die Stromstärke

$$I_1 = \frac{E R_1}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_{G_1}) + R_1 R_2},$$

in der anderen ist im Mittel

$$\bar{I}_2 = nCE = \frac{E R_1}{R_2 R_3\left[1 + \frac{R_{G_1}}{R_3} + R_1\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) + \frac{R_{G_1}}{R_2 R_3}\right]},$$

wenn beide Ströme einander aufheben (Fig. 161).

Endlich läßt sich noch das ballistische Galvanometer zur absoluten Kapazitätsmessung benutzen. Wird der Kondensator mit einer Spannung

E aufgeladen und gibt bei der Entladung den ballistischen Ausschlag x, so gilt für die Kapazität. $C = \mathfrak{E}\, k^{1/\pi \cdot \operatorname{arc} \operatorname{tg} \pi/\Lambda} \cdot x/E$. Ruft man mit derselben Batterie einen konstanten Ausschlag x_0 des Galvanometers hervor, in das ein großer Widerstand R eingeschaltet ist, so erhält man $C = \frac{T_0}{\pi} \frac{1}{R + R'} \cdot \frac{x}{x_0} \cdot k^{1/\pi \cdot \operatorname{arc} \operatorname{tg} \pi/\Lambda}$, wo R′ den Widerstand von Batterie und Galvanometer bezeichnet und T_0 die Schwingungsdauer der ungedämpften Nadel.

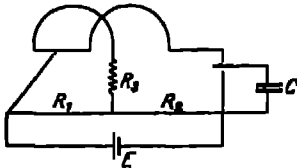



Fig. 161. Kapazitätsmessung mit dem Differentialgalvanometer.

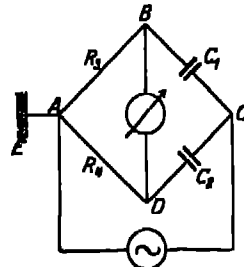



Fig. 162. Vergleichung von Kapazitäten.

3. Vergleichung von Kapazitäten.

Zwei Kondensatoren von der Kapazität C_1 und C_2 vergleicht man mit Wechselstrom in der Brücke (PALAZ). Als Stromanzeiger dient das Telephon oder das Vibrationsgalvanometer. Man schaltet in zwei Zweige die reinen Widerstände R_3 und R_4, in die beiden anderen Zweige die Kapazitäten C_1 und C_2. Ist die Brücke stromlos, so gilt $C_1 : C_2 = R_4 : R_3$.

Handelt es sich um die Vergleichung von Luftkondensatoren, so ist es zweckmäßig, die Widerstände R_3 und R_4 gleich zu wählen und in einen Zweig eine veränderliche Kapazität, z. B. einen Drehkondensator, einzuschalten und mit diesem die Brücke abzugleichen (Fig. 162).

Bei anderen Kondensatoren treten jedoch dielektrische Verluste auf, der Phasenwinkel φ weicht also um einen Betrag δ von $-90°$ ab. Die Brücke ist deshalb nur dann stromlos, wenn noch $\delta_1 - \delta_2 = \varphi_3 - \varphi_4$. Damit diese Gleichung erfüllt ist, muß man entweder einen kleinen Widerstand R zu C_1 oder C_2 in Reihe (M. WIEN 1891) oder eine kleine Kapazität C_3 oder C_4 zu R_3 oder R_4 parallel schalten [H. SCHERING 1920[5])]. Sind dann R_3 und R_4 reine Widerstände oder wenigstens solche mit gleicher Kapazität, so erhält man für den Verlustwinkel von C_1 $\delta_1 = \omega R C_2$ oder $\delta_1 = \omega R_4 C_4$, wo $\omega = 2\pi n$ die Kreisfrequenz bezeichnet.

Will man über die Winkel von R_3 und R_4 keine Voraussetzung machen, so wird bei einer zweiten Messung der Kondensator C_1 durch einen regelbaren verlustfreien Luftkondensator ersetzt; die Differenz der beiden Einstellungen für R oder C_4 ist alsdann für δ_1 maßgebend.

Die einwandfreie Messung in der Wechselstrombrücke erfordert, daß die Kapazität und Induktivität aller Zweige durch bifilare Anordnung der Zuleitungen sowie durch Abschirmung der Kondensatoren und Widerstände abgegrenzt und von der Umgebung unabhängig gemacht wird. Wir kommen hierauf bei der Messung der Induktivitäten zurück. Die Widerstände R_3 und R_4 stellt man wohl aus Manganindrähten her, die bifilar in Metallrahmen ausgespannt werden. Man erreicht unter diesen Bedingungen eine Genauigkeit von 0,1 $\mu\mu$F.

Für die Vergleichung von Kondensatoren, deren Kapazität die der Normalapparate übertrifft, benutzt man Glimmerkondensatoren, die vorher in kleineren Beträgen mit den Luftkondensatoren verglichen worden sind. Diese weisen in den Grenzen der Meßgenauigkeit keine Verlustwinkel auf, wenn sie keinen Überfluß an festen Dielektrika als Stützen usw. besitzen, woran vielfach die gebräuchlichen Drehkondensatoren kranken Selbst der Verlustwinkel der Glimmerkondensatoren, der 1 bis 2′ beträgt, rührt teilweise noch von dieser Ursache her und weniger vom Glimmer. Dazu kommt hier noch der Einfluß der Kontaktklötze und Zuleitungen nebst ihrer Isolierung.

Ferner ist der Verlustwinkel von der Betriebskapazität, d. h. von der Schaltungsweise der Kondensatoren abhängig. Handelt es sich um einen abgeschützten Kondensator, dessen Belegungen 1 und 2 von der Hülle 0 isoliert sind, so sei k_{12} die Teilkapazität beider Belegungen gegeneinander, k_{10} oder k_{20} die der Belegung 1 oder 2 gegen die Hülle; δ_{12}, δ_{10}, δ_{20} seien die entsprechenden Verlustwinkel. Schaltet man den Kondensator C_1 in die Brücke so ein, daß die Hülle und die Belegung 1 oder 2 am Punkte C liegt, 2 oder 1 an B, so wird die Betriebskapazität $k_{12} + k_{20}$ oder $k_{12} + k_{10}$ gemessen. Werden beide Belegungen kurzgeschlossen und an B gelegt, während die Hülle mit C verbunden ist, so wird $k_{10} + k_{20}$ beobachtet. Diesen Schaltungen entsprechen die Verlustwinkel. $\frac{k_{12}\delta_{12} + k_{20}\delta_{20}}{k_{12} + k_{20}}$, $\frac{k_{12}\delta_{12} + k_{10}\delta_{10}}{k_{12} + k_{10}}$, $\frac{k_{10}\delta_{10} + k_{20}\delta_{20}}{k_{10} + k_{20}}$.
Die Teilkapazität k_{12} läßt sich auch unmittelbar bestimmen, wenn die Hülle mit der geerdeten Ecke A, 1 mit C und 2 mit B verbunden wird. Die Teilkapazität k_{20} liegt dann parallel zu R_3, so daß, wenn der zu messende Kondensator durch das Normal ersetzt wird, die zu R_3 parallel geschaltete Gesamtkapazität um den Betrag k_{20} geändert wird, während

Bei den Glimmerkondensatoren ist zu beachten, daß die Kapazität mehrerer eingeschalteter Abteilungen nicht gleich der Summe der Kapazitäten der einzelnen Teile ist; der berechnete Wert übertrifft den wirklichen, und zwar ist der Unterschied größer bei der Stöpselschaltung als bei der Kurbelschaltung. Die dielektrischen Verluste der Stöpselapparate sind dagegen geringer als diejenigen der Kurbelanordnung, die eine größere Anzahl von Teilen verlangt.

Zweiundzwanzigstes Kapitel.

Induktivität.

Die Einheit der Induktivität L ist das Henry (H). Sie kommt einem Leiter zu, in dem die EMK von 1 Volt induziert wird, wenn sich die Stromstärke gleichmäßig in 1 Sekunde um 1 Ampere ändert. Ein Strom I erzeugt durch sein Entstehen oder Verschwinden in einem Leiter von der Induktivität L das Integral LI der EMK. Je nachdem dieser Strom in dem Leiter selbst oder in einem benachbarten fließt, unterscheidet man Selbst- und Gegeninduktivität.

1. Induktionsspulen.

Als Grundmaße der Induktivität dienen Spulen aus Kupferdraht, die auf Kerne aus eisenfreiem Marmor gewickelt sind, welche vorher unter Erwärmung auf 150° mit Paraffin oder dergleichen getränkt werden. Damit die Spulen auch bei Wechselstrom hoher Frequenz gebraucht werden können, wickelt man sie aus Litzen, die aus feinen, isolierten und miteinander verflochtenen Drähten bestehen; dadurch wird die ungleichmäßige Stromverteilung infolge der Hautwirkung vermieden. Man stellt gewöhnlich Rollen von 0,0001 bis 1 Henry und Vielfache dieser vier Dekaden her, wobei die Hauptnormale nur in einer Lage, die Gebrauchsnormale auch in mehreren gewickelt werden.

Letztere werden außerdem aus zwei Rollen zusammengesetzt, die gegeneinander verschoben oder verdreht werden können. Wickelt man dann noch die Einzelrollen solcher Variatoren in mehreren Abteilungen, die man gleich oder gegeneinander schalten kann, so entsteht ein ganzer Satz von Induktivitäten konstanten Widerstandes, womit sich auch Gegeninduktivitäten herstellen lassen.

2. Berechnung der Normalspulen.

Auf Normalspulen, deren Induktivität L aus den Abmessungen berechnet wird, wickelt man eine Lage Draht. L. Lorenz (1879) hat

setzung gilt, daß der elektrische Strom an der Oberfläche der Spule in unendlich dünner Schicht fließt. Wenn r und l den Halbmesser und die Länge der Spule bezeichnen und N die Windungszahl, so gilt:

$$L_s = \frac{8\pi}{3} N^2 r \left\{ \sqrt{1+\frac{l^2}{4r^2}}\left(\frac{4r^2}{l^2}+1\right)E + \sqrt{1+\frac{l^2}{4r^2}}\cdot F - \frac{4r^2}{l^2} \right\} = N^2 r\, Q,$$

wo F und E elliptische Integrale erster und zweiter Art in bezug auf den Modul $k = 1/\sqrt{1 + l^2/4r^2}$ bedeuten.

Für Q hat Rosa die folgende Tabelle aufgestellt:

2 r/l	Q	2 r/l	Q
0,20	3,63240	1,80	19,57938
0,30	5,23368	2,00	20,74631
0,40	6,71017	2,20	21,82040
0,50	8,07470	2,40	22,81496
0,60	9,33892	2,60	23,74013
0,70	10,51349	2,80	24,60482
0,80	11,60790	3,00	25,41613
0,90	12,63059	3,20	26,18009
1,00	13,58892	3,40	26,90177
1,20	15,33799	3,60	27,58548
1,40	16,89840	3,80	28,23494
1,60	18,30354	4,00	28,85335

Um die Formel auf eine Drahtspule anwenden zu können, hat Rosa[1] ferner eine Korrektion berechnet. Wenn L die Induktivität der Drahtspule bezeichnet, deren Drahtdicke d ist und deren Wicklung die Ganghöhe g besitzt, also $l = Ng$, so ist $L = L_s - 4\pi N r [A + B]$, wo das Glied A von dem Verhältnis d/g und das Glied B von der Windungszahl N abhängt. In den folgenden Tabellen sind einige der von ihm berechneten Werte aufgeführt.

$\frac{d}{g}$	A	$\frac{d}{g}$	A	N	B	N	B
1,00	0,5568	0,50	— 0,1363	1	0,0000	50	0,3186
0,95	0,5055	0,45	— 0,2416	5	0,2180	60	0,3210
0,90	0,4515	0,40	— 0,3594	10	0,2664	80	0,3257
0,85	0,3943	0,35	— 0,4928	15	0,2857	100	0,3280
0,80	0,3337	0,30	— 0,6471	20	0,2974	150	0,3311
0,75	0,2691	0,25	— 0,8294	25	0,3042	200	0,3328
0,70	0,2001	0,20	— 1,0526	30	0,3083	400	0,3351
0,65	0,1261	0,15	— 1,3403	35	0,3119	600	0,3359
0,60	0,0460	0,10	— 1,7457	40	0,3148	800	0,3363
0,55	— 0,0410	0,05	— 2,4369	45	0,3169	1000	0,3365

[1]) E. B. Rosa, Bull. Bur. Stand. 2, 161. 1906; E. B. Rosa u. L. Cohen

Nach diesen Formeln läßt sich L auf $1 \cdot 10^{-6}$ aus den Abmessungen der Spule bestimmen · d ergibt sich aus dem Gewicht und der Länge des Drahts; die Ganghöhe g und der Halbmesser der Wicklung werden an verschiedenen Stellen der Spule mit dem Komparator ermittelt. Der Halbmesser läßt sich auch aus der Drahtlänge ableiten, die man während des Wickelns der Spule feststellt[2]).

Für die mehrlagige Spule mit quadratischem Wicklungsquerschnitt, die vielfach als Induktivitätsnormal verwendet wird, hat STEFAN (1884) die Formel $L = 4\pi r N^2 \left\{\left(1 + \frac{1}{24}\frac{a^2}{r^2}\right) \ln \frac{8N}{a\sqrt{2}} - 0{,}848 + 0{,}0510\,\frac{a^2}{r^2}\right\}$ angegeben, wo a die Seite des Wicklungsquerschnitts und r den mittleren Halbmesser bedeutet. Dafür läßt sich auch schreiben.

$$L = 4\pi r N^2 f(\varepsilon) = \frac{2\, l^{\frac{5}{3}}\, \varepsilon^{\frac{2}{3}}}{(2\pi d)^{\frac{2}{3}}} f(\varepsilon)\,, \text{ wenn man } \varepsilon = \frac{a}{r}$$

setzt und l die Drahtlänge, d den Durchmesser des umsponnenen Drahts bezeichnet. $\varepsilon^{\frac{2}{3}} f(\varepsilon)$ ist ein Maximum, l also ein Minimum, wenn $1/\varepsilon = 1{,}5$ ist. Auf 1% lassen sich die Spulen nach dieser Formel berechnen. Für $r = 2a$ ist nach KORNDÖRFER[3]) näherungsweise $L = 21\, N^2 r$. Wegen anderer Spulenformeln wird auf ESAU[4]) verwiesen.

Für die Induktivität einfacher Drahtformen sei angegeben: Gerader Draht von der Länge l und dem Durchmesser d. $L = 2l\left(\ln \frac{4l}{d} - 0{,}75\right)$,

Drahtkreis vom Halbmesser r, groß gegen d, $L = 4\pi r\left(\ln \frac{2r}{d} + 0{,}33\right)$,

Rechteck mit den Seiten a und b, groß gegen d; $\sqrt{a^2 + b^2} = c$,

$$L = 4\left\{a \ln \frac{4ab}{d(a+c)} + b \ln \frac{4ab}{d(b+c)} - 2(a + b - c)\right\} + (a + b)\,.$$

Ein Paar Bifilardrähte, Abstand ihrer Achsen = a; im hinreichenden Abstand von den Enden für die Länge l: $L = l\left(4 \ln \frac{2a}{d} + 1\right)$.

Alle Formeln gelten für niedrige Frequenzen, wo der Strom den Drahtquerschnitt ganz ausfüllt. Die Änderungen, die sie für schnelle Schwingungen erleiden, wo die Ströme nur an der Oberfläche fließen, haben SOMMERFELD[5]) und MIE[6]) abgeleitet.

Setzt man die Längen in Zentimeter ein, so ergibt sich L in elm. CGS (cm); Division durch 10^9 liefert Henry.

---

[2]) E. GRÜNEISEN u. E. GIEBE, Wiss. Abhandl. der P.-T. Reichsanstalt 5, 1. 1922; Ann. Phys. 63, 179. 1920.

[3]) M. KORNDÖRFER, ETZ 1917, 521.

[4]) A. ESAU, Jahrb. drahtl. Tel. 5, 212. 1911; 14, 386. 1919; 15, 2. 1920.

[5]) A. SOMMERFELD, Wied. Ann. 67, 233. 1899; Ann. Phys. 15, 673. 1904.

3. Messung von Induktivitäten in der Brücke.

Die Normalspulen, deren Induktivität aus der Gestalt und ihren Ab messungen berechnet worden ist, können untereinander und mit un bekannten Induktivitäten auf elektrischem Wege verglichen werden Meistens bedient man sich für diesen Zweck des Wechselstromes und de WHEATSTONEschen Brücke, bei deren Anordnung bestimmte Regeln zu beachten sind.

Die Zweige 1 und 2 (Fig. 163) mögen die zu vergleichenden Spule mit den Induktivitäten L_1 und L_2 sowie mit den OHMschen Widerstände R_1 und R_2 enthalten, die Zweige 3 und 4 die beiden reinen Widerständ R_3 und R_4. Im Hauptkreis befinde sich als Stromquelle ein Gleichstrom unterbrecher mit Transformator für niedrige Frequenz oder eine Wechsel

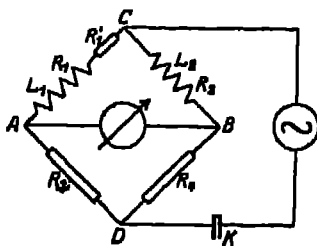



Fig. 163. Vergleichung von Induktivitäten.

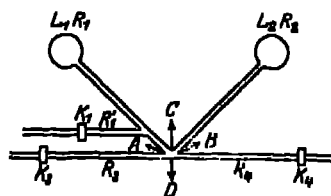



Fig. 164. Geschlossene Brücke.

stromsirene, ferner ein Kondensator K, durch den zusammen mit de Induktivität des gesamten Stromkreises Resonanz in bezug auf di benutzte Frequenz hergestellt und der Strom von Oberschwingunge gereinigt wird. Um den Strom in der Brücke zum Verschwinden zu bringen, ist im allgemeinen in einen Zweig, z. B. in 1, ein reiner Wider stand R_1' hinzuzufügen. Die Bedingung lautet dann, wenn $\sqrt{-1} =$ j gesetzt wird, $\frac{R_1 + R_1' + j\omega L_1}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{R_3}{R_4}$ oder $R_1 + R_1' : R_2 = R_3 : R_4$ un $L_1 : L_2 = R_3 : R_4$. Ist die Brückeneinstellung, wie man daraus schließe sollte, von der Frequenz nicht unabhängig, trotzdem die Hautwirkun durch Anwendung von Litzen vermieden wird, so liegt dies an de Kapazität der Spulen. Fehlerquellen entstehen ferner aus der nie gan fehlenden Induktivität von R_3 und R_4 und besonders aus der gegen seitigen Induktion zwischen den verschiedenen Brückenzweigen und de Kapazität der Schaltung gegen Erde.

Um sich davon zu befreien, benutzt GIEBE[7]) statt der offenen die ge schlossene Brücke. Bei dieser sind die Ecken ABCD dicht beieinande angeordnet. Die Widerstände R_1', R_3 und R_4 bestehen aus bifilar ge

spannten Manganindrähten, die durch verschiebbare Klemmen K_3, K_4 und den Gleitkontakt K_1 verbunden werden. Die Zuleitungen zu den Spulen, zur Stromquelle und zum Galvanometer werden sorgfältig bifilar angeordnet. Ferner sind die Rollen in Holzkästen eingeschlossen, die innen mit dünnem Stanniol ausgelegt sind, das mit dem Messer eingeritzt ist, damit keine Wirbelströme entstehen Endlich ist die Brücke im Punkte D zu erden, was wirkungsvoller ist als in C; A und B dürfen nicht geerdet werden. Unbeschützt kann man die Widerstände R'_1, R_3 und R_4 lassen, weil die Kapazität solcher Bifilardrähte sehr gering ist. Die Zuleitungen werden durch Messingrohre geschützt, die ebenso wie die Stanniolbelegungen mit D verbunden werden.

Die Schaltung dient nicht allein zur Vergleichung von Induktivitäten, sondern auch zu ihrer absoluten Messung (M. WIEN 1891), wobei der Widerstand R'_1 nicht in Reihe mit R_1, sondern parallel dazu gelegt wird. Ein Sinusstrom von der Frequenz $\omega = 2\pi n$ verschwindet im Brückenzweig, wenn $\frac{R'_1(R_1 + j\omega L_1)}{R'_1 + (R_1 + j\omega L_1)} : (R_2 + j\omega L_2) = R_3 : R_4$ oder nach Trennung des imaginären vom reellen Teil:

$$\omega^2 L_1 L_2 = (R'_1 + R_1) R_2 - R'_1 R_1 R_4 / R_3$$

und $L_1 (R'_1 R_4 / R_3 - R_2) = L_2 (R'_1 + R_1)$, woraus für die unbekannte Induktivität L_1 folgt:

$$\omega^2 L_1^2 = (R'_1 + R_1)^2 \frac{R_2 - R'_1 R_1 R_4/(R'_1 + R_1) R_3}{R'_1 R_4/R_3 - R_2}.$$

An die Abgleichung der Brücke mit Wechselstrom schließt man die Messung mit Gleichstrom. Muß hierbei R_2 um R_0 verkleinert werden, so ist $R_2 = R_0 + \frac{R'_1 R_1 R_4}{R_3 (R'_1 + R_1)}$. Darauf wird der Stromzweig R_1 geöffnet, wonach wenn R_2 um R'_0 vergrößert werden muß, $R'_1 R_4 = (R_2 + R'_0) R_3$, so daß für die obige Gleichung nach Einsetzung von R_0 und R'_0 folgt: $L_1 = \frac{R_4}{R_3} \frac{R_1'^2}{\omega} \sqrt{\frac{R_0}{R'_0}} \cdot \frac{1}{R_0 + R'_0}$. Man beobachtet mit Induktorium und Saitenunterbrecher, wobei dessen Ton mit einer Stimmgabel bekannter Schwingungszahl in Übereinstimmung gebracht wird, oder bei $n > 500$ mit der Wechselstromsirene. In der Brücke wird für niedrige Frequenzen das optische Telephon oder ein Vibrationsgalvanometer, für höhere das Hörtelephon benutzt.

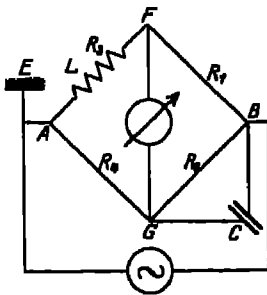
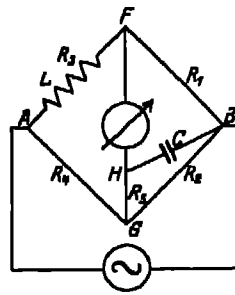
4. Vergleichung einer Induktivität mit einer Kapazität.

Für die Vergleichung einer Induktivität mit einer Kapazität hat MAXWELL ein Verfahren angegeben. Ist diese vorher in Farad gemessen,

hält man die Induktivität in Henry. Denn da $[L] = [C R^2] =$ Farad · Ohm¹ und $[C] = \left[\frac{1}{n R}\right] = \frac{\text{sec}}{\text{Ohm}}$, so folgt $[L] = \left[\frac{R^2}{n R}\right] =$ Ohm · sec = Henry.

Grundsätzlich ist das Ergebnis einer solchen elektrischen Messung die sich auf das intern. Ohm stützt, zu unterscheiden von demjenigen das die Rechnung nach den Abmessungen der Spule liefert Aus de Bestimmung einer Induktivität auf beiden Wegen, die zuerst KIRCH HOFF (1849) unter Benutzung einer Gegeninduktivität ausführte, folg das Verhältnis des aus der Quecksilbereinheit abgeleiteten Ohms unc seiner theoretischen Definition als 10^9 CGS. Nach den neuesten Unter suchungen ist das intern Ohm um $^1/_2{}^0/_{00}$ größer al das absolute.

Fig. 165. Fig. 166.
Vergleichung von Kapazität und Induktivität.

Die Schaltung zur Be stimmung des Verhält nisses L/C zeigt Fig. 165 In Zweig 3 liegt die In duktivität L von dem kleinen Widerstande R_3 in drei anderen Zweige die Widerstände R_1, R und R_4. Zu R_2 ist di Kapazität C parallel geschaltet Für die Stromlosigkeit der Brücke gil $R_1 R_4 = R_2 R_3$ und $L = R_1 R_4 C$. Beide Bedingungen lassen sich mi regelbaren R_3 und C erfüllen.

Berücksichtigt man, daß auch die Zweige 1, 2 und 4 kleine Induktivi täten und Kapazitäten enthalten, so ergibt sich als Bedingung für die Ab gleichung der Brücke: $L = R_1 R_4 (C + c_a) - \frac{R_1 R_4}{R_2} (R_1 k_1 + R_4 k_4 - R_2 k_2)$ wenn c_a die Kapazität eines kleinen Drehkondensators und die Größen k Korrektionen für die erwähnten Mängel der anderen Zweige bilden die wie Kapazitäten wirken

Um ihre Bestimmung zu umgehen, ersetzten GRÜNEISEN und GIEBE[8] die Induktivität durch einen Bifilardraht gleichen Widerstandes un berechenbarer Induktivität l und schalteten die Kapazität C ab. Zu Wiederherstellung des Gleichgewichts werde der Drehkondensator vo c_a auf c_1 geändert. Dann gilt $l = R_1 R_4 c_1 - \frac{R_1 R_4}{R_2} (R_1 k_1 + R_4 k_4 - R_2 k_2$ und $L - l = R_1 R_4 (C + c_a - c_1)$. l wird nach der Formel für die In

duktivität von Bifilardrähten berechnet; für R_1, R_2 und R_4 werden Wechselstromwiderstände kleiner Induktivität und Kapazität gewählt, z. B solche, bei denen ein Manganindraht unifilar in einem Metallrahmen so hin und her geführt ist, daß je zwei benachbarte Drahtabschnitte entgegengesetzt gerichtete Ströme führen. Die gebräuchlichen Gleichstromwiderstände verursachen Störungen durch ihre Kapazität, und in ihrer Isolierung treten dielektrische Verluste auf

Das MAXWELLsche Verfahren zur Vergleichung einer Induktivität mit einer Kapazität ist mannigfach abgeändert worden. ANDERSON (1891) schlug die Schaltung der Fig. 166 vor, wo der Kondensator mit einem Punkte H verbunden ist und zwischen G und H ein regelbarer Widerstand R_5 liegt[9]). Man stellt die Brücke zunächst bei Gleichstrom so ein, daß $R_1 R_4 = R_2 R_3$. Darauf gleicht man den Widerstand R_5 so ab, daß die Brücke auch bei Wechselstrom stromlos ist. Dann gilt $L = C\left(R_1 R_4 + R_5 (R_1 + R_2)\right)$.

5. Messung einer Induktivität mit dem ballistischen Galvanometer.

Mit Gleichstrom läßt sich eine Induktivität in der Brücke messen unter Verwendung eines ballistischen Galvanometers G, dessen Widerstand R_g betrage. Die Induktivität L (Fig. 167) befinde sich im Zweige 3, die übrigen sollen reine Widerstände enthalten. In den Hauptkreis wird ein Strommesser S eingeschaltet, der den Strom I anzeige, wenn die Brücke abgeglichen ist. Alsdann wird der Strom unterbrochen; durch den entstehenden Extrastrom erfahre die Nadel den ballistischen Ausschlag x. Dann ist

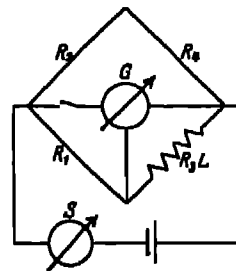



Fig. 167. Messung der Induktivität mit dem ball. Galvanometer.

$$L = f \frac{T}{\pi I} \mathfrak{C}\, x\, k^{1/\pi \cdot \operatorname{arc\,tg} \pi/\Lambda}, \text{ wo}$$

$$f = [(R_2 + R_4)(R_1 + R_2) + R_g (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)]/R_2,$$

T und k die Schwingungsdauer und das Dämpfungsverhältnis des Brückengalvanometers, $\mathfrak{C}$ den ballistischen Reduktionsfaktor bezeichnet.

Anstatt I zu messen, beobachtet man mit G den Ausschlag x', nachdem in den Zweig 3 ein kleiner Widerstand R zugeschaltet worden ist. Dann erhält man $L = R \cdot \frac{T}{\pi} \frac{x}{x'} \cdot k^{1/\pi \cdot \operatorname{arc\,tg} \pi/\Lambda}$. Das Verfahren wird nur selten gebraucht, da die Nullmethoden genauer sind als die Beobachtung von Ausschlägen[10]).

[9]) E. B. ROSA u. F. W. GROVER. Bull. Bur. Stand. 8, 291. 1905.

6. Gegeninduktivität.

In bezug auf die Formeln von Gegeninduktivitäten sei auf die Zu sammenstellung von ROSA und GROVER[11]), ferner auf die Arbeiten vo ESAU[12]) verwiesen. Wir beschränken uns auf die Angabe der Gegen induktivität zweier konzentrischer Spulen: die eine lange vom Halb messer r besitze n Windungen auf dem Zentimeter, die andere kurz habe insgesamt N Windungen von der Gesamtfläche F.

Wenn sich die kurze mitten im Innern der langen befindet, so ist di Gegeninduktivität $M_{12} = 4\pi n F$; liegt die kurze außen dicht auf de langen, so daß alle ihre Kraftlinien auch die kurze durchdringen, s erhält man $M_{12} = 4\pi^2 n r^2 N$. Besteht die lange Spule aus m Lage von den Halbmessern $r_1, r_2, r_3 \ldots$, so ist $r^2 = (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + \ldots)/m$. Wi werden hierauf bei der Behandlung magnetischer Felder zurückkommen

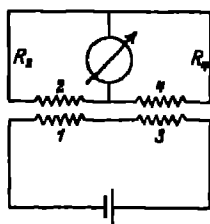



Fig. 168 Fig. 169.
Vergleichung von Gegeninduktivitäten.

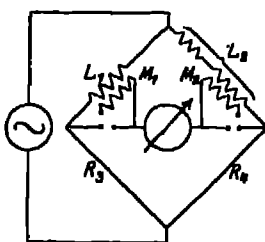
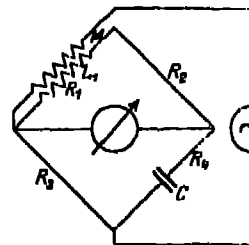



Fig. 170. Vergleichun einer Gegeninduktivit mit einer Kapazität.

Bei dem Vergleich zweier Gegeninduktivitäten M_{12} und M_{34} werde nach MAXWELL die primären Windungen mit der Batterie in einen Stron kreis, die sekundären mit dem Galvanometer in einen zweiten geschalte wie Fig. 168 angibt. Sind dann die in den Zweigen 2 und 4 eingeschaltete reinen Widerstände R_2 und R_4 so abgeglichen, daß der Stromanzeig bei Stromwechsel in Ruhe bleibt, so ist $M_{12} : M_{34} = R_2 : R_4$. Zu R_2 un R_4 rechnen auch die Kupferwiderstände der Spulen, die so aufgestel werden, daß sie keine induzierende Wirkung aufeinander ausüben.

Schaltet man nach CAMPBELL[13]) die Spule L_1 der Gegeninduktivität M (Fig. 169) in den Zweig 1, die primäre Spule einer veränderlichen Gege induktivität M_2 (z. B. eines Variators) nebst einer zweiten Induktivitä die beide zusammen mit L_2 bezeichnet werden mögen, in den Zweig und reine Widerstände R_3 und R_4 in die Zweige 3 und 4, so ist bei offene sekundären Spulen $L_1 : L_2 = R_1 : R_2 = R_3 : R_4$.

---

[11]) S. B. ROSA u. F. W. GROVER, Bull. Bur. Stand. 8, 1. 1911.

[12]) A. ESAU, Ann. Phys. 61. 410. 1920; Jahrb. drahtl. Tel. 17. 83 u. 242. 192

Man fügt alsdann die sekundären Spulen so in die Brücke ein, daß sie gegeneinander wirken, und gleicht die Brücke durch Veränderung von M_2 ab. Bedeutet I_1 den Strom in 1 und 3 und I_2 in 2 und 4, so ist $j\omega M_1 I_1 = j\omega M_2 I_2$, $R_3 I_1 = R_4 I_2$ und $M_1 \cdot M_2 = R_3 : R_4$.

In einer abgeänderten Brückenschaltung (Fig. 170) wird nach FOSTER[14]) die Gegeninduktivität M oder vielmehr ihre primäre Spule L_1 mit einer Kapazität C verglichen. Verschwindet der Strom in der Brücke, so fließt in den Zweigen 1, 2 und 4 der Strom I_1, in 3 der Strom I_3, wo $I = I_1 + I_3$, und im Falle von Sinusstrom gilt:

$$I_1 (R_1 + R_2 + j\omega L_1) - (I_1 + I_3) j\omega M = 0, \quad I_3 R_3 - I_1 \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C}\right) = 0$$

oder nach Elimination von I_3 und Trennung der reellen und imaginären Glieder: $C = \frac{M}{R_3 (R_1 + R_2)}$ und $L_1 = \frac{M (R_3 + R_4)}{R_3}$.

Für $R_4 = 0$ ist $L_1 = M$.

Dreiundzwanzigstes Kapitel.

Leistung und Arbeit des Stromes.

Die Einheit der Stromleistung N ist das intern. Watt. Sie ist gleich der Leistung von 1 Ampere in einem Leiter von 1 Volt Endspannung. Watt = [N] = [E I] = Volt · Ampere = 10^7 · Erg. $\sec^{-1}$.

Für Wechselstrom ist $N = \frac{1}{T}\int_0^T ip\,dt = I P \cos\varphi$, wenn i, p die Augenblickswerte, I, P die effektiven Werte von Strom und Spannung und φ die Phasenverschiebung zwischen beiden bedeuten.

Die Einheit der Stromarbeit A ist das intern. Joule oder die Wattsekunde. Sie ist gleich der Arbeit, die in 1 Sekunde bei einer Leistung von 1 Watt verrichtet wird. Joule = [A] = [E I t] = Watt · sec = 10^7 Erg = 0,239 cal; 1 Wattstunde = 860,4 cal; 1 kWh = 860,4 kcal.

Zur Bestimmung der Leistung und der Arbeit des Stromes kann man die einzelnen Faktoren des Produkts messen, wie schon bei den kalorimetrischen Versuchen erörtert worden ist, wo es sich um die Stromwärme handelte. Hat der Strom nur den Widerstand zu überwinden und ist dieser konstant, so kann man sich auf die Messung der Stromstärke beschränken. Anderenfalls ist es zweckmäßiger, sowohl die Spannung als auch die Stromstärke zu verfolgen, um sich von den Änderungen des Widerstandes unabhängig zu machen.

Mit dem Dynamometer läßt sich unmittelbar das Produkt E I messe Die eine Spule I des Instruments, das bei dieser Verwendung als Leistung messer (Wattmeter) bezeichnet wird, durchfließt der Strom, die ande II ist an die Spannung desjenigen Leiters gelegt, in dem die Leistu bestimmt werden soll. Besitzt die Spule II den Widerstand R_{II}, so i $I_{II} = E_{II}/R_{II}$, und für die Leistung ergibt sich: $N = C\,R_{II}\,\alpha = I_I\,E_I$ wenn C die Konstante des Instruments für Strommessung ist, al $I_I\,I_{II} = C\,\alpha$ Fig. 171 zeigt die Schaltung I ist die dickdrähtige Stror spule, II die feindrähtige Spannungsspule. Die zu messende Leistu $E_r\,I_r$ im Widerstande R ist um $E_R\,I_{II}$ kleiner als N, und man erhäl $E_r\,I_r = \frac{N}{1 + R/R_{II}}$. R_{II} hat gewöhnlich einen großen Wert, da d Spannungsspule meistens noch ein Widerstand vorgeschaltet ist, so da R/R_{II} gegen 1 klein ist.

Bei der Leistungsmessung von Wechselströmen ist auf die Induktivit der beweglichen Spannungsspule Rücksicht zu nehmen, die 0,01 b 0,1 H betragen kann. Hat der Strom geg die Spannung die Phasenverschiebung δ, w $\operatorname{tg}\delta \sim \delta = \omega\,L_{II}/R_{II}$, so sind die Angaben d Leistungsmessers mit $(1 + \delta^2)\,(1 \pm \delta \operatorname{tg}\varphi)$ z multiplizieren; φ bezeichnet hier die Phase differenz zwischen E_{II} und dem Strome I_I. Das positive Vorzeiche ist zu nehmen, wenn der Strom der Spannung vorauseilt. Unsymmetr der Spulenanordnung eliminiert man durch Kommutieren, was b Wechselstrom zweimal, bei Gleichstrom viermal geschehen muß.

Fig. 171. Leistungsmesser.

Das Dynamometer ist für Leistungsmessungen in mannigfacher Wei als Zeigerinstrument ausgebildet. Die Stromspule steht fest, währen die Spannung der beweglichen Spule mittels Spiralfedern, welche d Richtkraft liefern, über einen Vorschaltwiderstand zugeführt wir Die Stärke der eisenfreien Felder ist nicht groß, so daß das Erdfeld, ga abgesehen von anderen benachbarten magnetischen Kräften, auf Gleic strommessungen von Einfluß und durch Kommutierung zu eliminiere ist Kräftigere Felder erreicht man durch Anwendung von Eisen: d Stromspule wird in einen aus Blechen zusammengesetzten Eisenkörp eingelegt, in dessen Innern sich die bewegliche Spannungsspule in eine schmalen Luftschlitz bewegt, da sie wiederum noch einen festen Eise kern umschließt. So verlaufen die Kraftlinien nur in diesem Spalt dur Luft, sonst durch Eisen, so daß sie gegen die Störung durch fremd Felder geschützt sind. Fig. 172 zeigt schematisch die Anordnung d SIEMENSschen Leistungsmessers. Die Dämpfung wird hier durch eine

Mehrfache Meßbereiche werden dadurch hergestellt, daß man die Stromspule mehrteilig macht und die Teile entweder hinter oder parallel zueinander schaltet. Ein anderes Verfahren besteht darin, daß durch einen Umschalter die Hälfte des Spannungsstromes durch einen im Instrument angebrachten Nebenschluß geleitet und dadurch unwirksam gemacht werden kann.

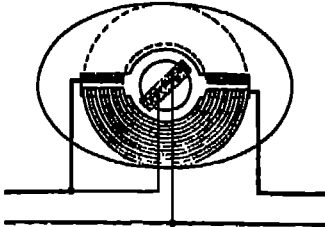



Fig. 172. Leistungsmesser.

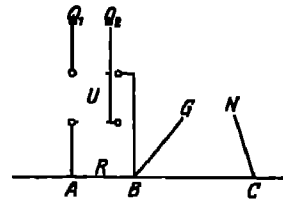



Fig 173. Leistungsmessung mit dem Elektrometer.

Die Leistungsmesser sind in weiten Grenzen von der Frequenz unabhängig und weisen einen geringen Eigenverbrauch auf.

Ferner kann man die Leistung mit dem Elektrometer messen. Dieses Instrument hat den Vorteil, daß es keine Induktivität besitzt; auch die Kapazität ist so gering, daß sie meistens ohne Einfluß bleibt. Dazu kommt, daß man das Verfahren nach der Eichung mit Gleichstrom ohne weiteres auf Wechselströme mit großer Phasenverschiebung übertragen kann, wobei nur zu vermeiden ist, größere Kapazitäten durch lange Zuleitungen in die Schaltung zu bringen. Statt geflochtener Doppelschnüre werden dünne Einzeldrähte benutzt, die im Abstande von etwa 1 cm parallel gezogen werden[1])

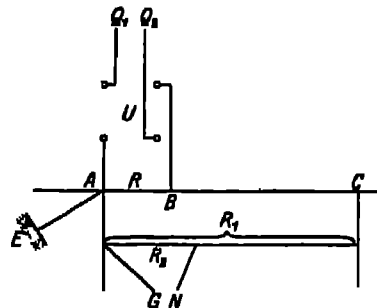



Fig. 174. Leistungsmessung im Hochspannungskreis.

Für die Leistungsmessung wird die Quadrantenschaltung gebraucht· ein Quadrantenpaar liegt am Gehäuse, zwischen diese und die Nadel schaltet man eine größere Spannung von etwa 100 bis 200 Volt, zwischen die Quadrantenpaare eine kleine von etwa 0,1 bis 1 Volt. Spannungen über 200 Volt legt man nicht unmittelbar an die Nadel, sondern benutzt einen Spannungsteller, dessen eines Ende geerdet wird.

Ist die Leistung zu messen, die in dem Teil BC eines Stromkreis verbraucht wird, so schaltet man einen induktionsfreien Meßwiderstan R ein, verbindet B mit dem Gehäuse, C mit der Nadel und die End AB von R über einen Umschalter U mit den Quadrantenpaaren Q_1 u Q_2 und beobachtet die Ausschläge α beim Umschalten (Fig. 173).

Wenn mit e der Augenblickswert der Spannung zwischen B und mit i der entsprechende Wert der Stromstärke bezeichnet wird, so erhä man für die gesuchte Leistung: $N = \mathfrak{M}(e\,i) = \frac{C_1}{R}\alpha - \frac{1}{2} I^2 R$ T Konstante C_1 wird durch Gleichstrom bestimmt und vorher zweckmäß durch Justierung des Instruments von der Nadelspannung unabhäng gemacht.

Liegt A C in einem Hochspannungkreis, so kann man den Spannung teiler an A C legen und A erden (Fig. 174). Alsdann folgt

$$N = \mathfrak{M}(e\,i) - I^2 R = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{C}{R}\alpha + \frac{R_1 - 2R_2}{2R_2} I^2 R\,.$$

Das Verfahren versagt, wenn die Nadelspannung unter 10 Volt sinl wenigstens ist dann eine Genauigkeit von $1\,^0/_{00}$ wie bei größeren Spa nungen nicht zu erreichen.

IV. Magnetismus.

Vierundzwanzigstes Kapitel.

Temporärer und permanenter Magnetismus.

Bringt man einen Eisenkörper in ein magnetisches Feld, dessen Stärke $\mathfrak{H}$ stufenweise vergrößert wird, so erhält man bei dem Ausgang vom unmagnetischen Zustande für die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ die Nullkurve OPA (Fig. 175), die anfangs fast geradlinig verläuft, dann umbiegt und nach einem steilen Anstieg immer mehr in eine fast horizontale Gerade übergeht. Die Abhängigkeit der Permeabilität $\mu = \mathfrak{B}/\mathfrak{H}$ von der Induktion $\mathfrak{B}$ zeigt Fig. 176; μ nähert sich mit zunehmendem $\mathfrak{B}$ der Einheit.

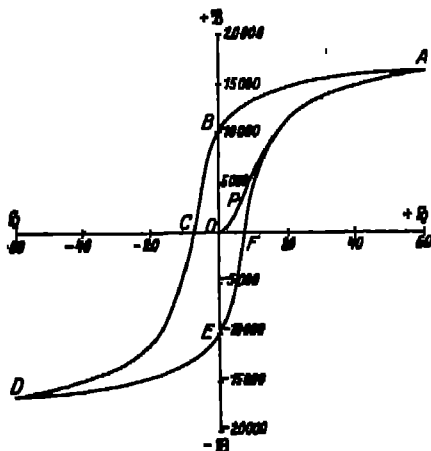
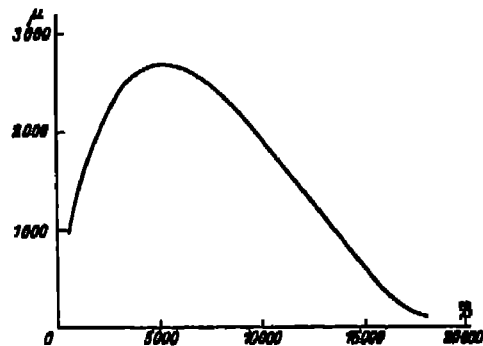



Fig. 175. Magnetisierungskurve. Fig. 176. Permeabilitätskurve.

Kehren wir nun zu Fig. 175 zurück: Wird die Feldstärke nach Erreichung der höchsten Induktion wieder verringert, so bewegt sich diese auf dem Kurvenast AB und wird erst Null, nachdem die Feldstärke den negativen Wert OC angenommen hat. Bei weiterer Abnahme auf negative Feldstärken entsteht der Ast CD und nun rückwärts das Stück DEA. Wir haben damit eine geschlossene Schleife durchlaufen, die

Die Induktion OB, die bei der Feldstärke 0 noch besteht, heißt Remanenz, die Feldstärke OC, welche die Remanenz zum Verschwinden bringt, ist die Koerzitivkraft.

Die Induktion des Eisens hängt nicht allein von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ ab sondern auch von der Vorgeschichte. Diese Hysterese bewirkt, daß zur Ummagnetisierung eine Arbeit A aufgewendet werden muß, die für einen Zyklus dem Flächeninhalt der Hystereseschleife entspricht (WARBURG 1881); also $A = \frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{H}\, d\,\mathfrak{B}$. Diese Arbeit, die in Wärme umgesetzt ist, wächst mit der Remanenz und der Koerzitivkraft. In der Technik wird der Hystereseverlust in Watt/kg Eisen nach der Näherungsformel (STEINMETZ 1891) $A = \eta\, \mathfrak{B}^{1,6}$ berechnet, wo η eine Materialkonstante darstellt. Treffender ist die Formel (RICHTER 1910) $A = a\,\mathfrak{B} + b\,\mathfrak{B}^2$, wo die beiden Konstanten a und b durch Beobachtung mit zwei Induktionswerten zu bestimmen sind.

Die Breite der Hysteresisschleife und der Wert von A werden bestimmt durch die chemische Zusammensetzung und das Gefüge der Eisenprobe. kohlenstoffarme und weiche Sorten weisen eine schmale Schleife auf; mit der Härte und dem Kohlenstoffgehalt nimmt die Breite zu. Dasselbe gilt für die Koerzitivkraft, welche für die remanente Magnetisierung der Dauermagnete von besonderer Bedeutung ist. Sie werden aus kohlenstoffreichem Stahl hergestellt, der im glühenden Zustande in Wasser oder Öl abgelöscht große Härte annimmt. Die Aufnahmefähigkeit für permanenten Magnetismus hängt von der Härtungstemperatur ab (HOLBORN 1891). Außerdem natürlich von der chemischen Zusammensetzung: dem gewöhnlichen Kohlenstoffstahl wird der wolframhaltige vorgezogen, auch der Zusatz von Chrom bewirkt eine Verbesserung, am meisten jedoch ein solcher von Kobalt, mit welchem man bis 30% geht. Eine solche Legierung, als Koerzit bezeichnet, liefert viermal so gute Magnete als Wolframstahl, wenn man die Güte nach dem Produkt von Remanenz und Koerzitivkraft bemißt. Wird dem Koerzit noch Molybdän zugesetzt, so erhält man einen Stahl, der an der Luft hart wird und der Ablöschung in Wasser oder Öl nicht bedarf[1]).

Ein frisch gehärteter und magnetisierter Stab verliert mit der Zeit einen Teil seines Magnetismus. Um diesen dauerhaft zu machen, was für die Messungen große Vorteile bietet, wird der Stab mehrere Stunden lang auf 100°, etwa im Dampfe siedenden Wassers, erwärmt. Durch eine solche künstliche Alterung wird ein gelindes Anlassen erzielt, das sonst im Laufe der Zeit bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt. Dann

[1]) E GUMLICH, ZS. f. Phys. 14, 241. 1923; F. STÄBLEIN, ZS. f. techn.

von neuem magnetisiert, wird der Magnet wiederholt kurze Zeit auf 100° erhitzt und abgekühlt. Dabei geht noch ein Teil des Magnetismus wieder verloren, der Rest ist aber von Dauer und erfährt nur geringe regelmäßige Änderungen infolge der Temperaturschwankungen, die beim gewöhnlichen Gebrauch vorkommen (Strouhal und Barus 1883). Der Temperaturkoeffizient beträgt 3 bis $6 \cdot 10^{-4}$/Grad[2]).

Für die Wirkung in die Ferne kann man sich den Magnetismus eines Stabes in zwei Punkten zusammengedrängt denken, deren Abstand etwa $^5/_6$ der Stablänge beträgt [F. Kohlrausch[3])]. Wegen der kleineren entmagnetisierenden Kraft sind gestreckte Formen für starke und haltbare Magnete vorzuziehen.

Fünfundzwanzigstes Kapitel.

Die magnetische Feldstärke.

Die magnetische Feldstärke eines Ortes wird durch die auf den Einheitspol ausgeübte Kraft dargestellt. Als praktisches Maß dient die Einheit des elektromagnetischen CGS-Systems, welche Gauß genannt wird. 0,000 01 Gauß bezeichnet man wohl mit γ. Ferner wird als Einheit die Zahl der Amperewindungen auf einem Zentimeter benutzt; es ist $1\ \mathrm{AW} \cdot \mathrm{cm}^{-1} = 0{,}4\,\pi$ Gauß.

1. Das Erdfeld.

a) Absolute Messung. Das verbreitetste magnetische Feld ist dasjenige der Erde, an dem zuerst die Verfahren zur Messung ausgebildet worden sind. Man verstärkt oder schwächt das Erdfeld nach Bedarf durch Magnete oder Stromspulen, wobei jedoch die Gleichmäßigkeit über weite Grenzen verloren geht. Deshalb werden zur Schwächung der Richtkraft mit Vorteil astatische Magnetpaare angewandt, die aus zwei entgegengesetzt gerichteten Magneten bestehend nur eine kleine Richtkraft erfahren.

Die Stärke $\mathfrak{H}$ des horizontalen Erdfeldes, die in unseren Breiten etwa 0,2 Gauß beträgt, wird mit dem Magnetometer beobachtet (Gauss 1836). Es besteht aus einer an einem Faden aufgehängten Magnetnadel, die durch eine starke Luft- oder Kupferdämpfung schnell zur Ruhe kommt und mit Spiegel und Skala beobachtet wird, und einer sich beiderseits der Nadel erstreckenden Bank, auf der ein Schlitten verschiebbar ist. Auf diesen legt man einen größeren Magnetstab und beobachtet die durch ihn hervorgebrachte Ablenkung der Nadel, für welche mit Vorteil

---

[2]) E. Gumlich, Ann. Phys. 59, 668, 1919.

ein kurzer Magnet benutzt wird, auch wohl eine kreisförmige Stahlschei
von etwa 2 cm Durchmesser, die geschliffen und poliert gleichzeitig
Spiegel dient. Sie hängt an einem auf einer Glasröhre befestigten T
sionskreis, die den Quarz- oder Kokonfad
gegen Luftströmungen schützt

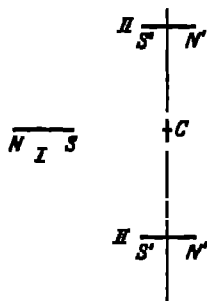



Fig. 177. I. u. II. Hauptlage.

Das Verhältnis der Direktionskraft
dieses Fadens zu der magnetischen D, al
$D_f/D = \Theta$ heißt Torsionsverhältnis. Es ve
kleinert jede Ablenkung der Nadel im Ve
hältnis $1/(1+\Theta)$ und ihre Schwingungsdau
im Verhältnis $1/\sqrt{1+\Theta}$. Zur Bestimmun
von Θ wird der Torsionskreis um den Wink
α gedreht; erfährt dabei die Nadel die A
lenkung φ, so ist $\Theta = \varphi/(\alpha - \varphi)$.

Ein Magnet NS von der Polstärke $\mathfrak{m}$, dem Polabstand $\mathfrak{L}$ und de
Moment $M = \mathfrak{L}\,\mathfrak{m}$ übt in der ersten Hauptlage (Fig. 177) auf den Ei
heitspol, der in der Verlängerung der Stabachse im Punkte C lie
eine Kraft P aus, die sich aus den Einzelwirkungen der beiden Pole z
sammensetzt und durch die Gleichung

$$P = \frac{\mathfrak{m}}{(a - \frac{1}{2}\mathfrak{L})^2} - \frac{\mathfrak{m}}{(a + \frac{1}{2}\mathfrak{L})^2} = \frac{2M}{a^3}\left(\frac{1}{1 - \frac{1}{4}\mathfrak{L}^2/a^2}\right)^2$$

gegeben ist, wenn a die Entfernung des Einheitspols vom Mittelpun
des Magnets NS bezeichnet. Entwickelt man in eine Reihe, so komr

$$P = \frac{2M}{a^3}\left(1 + \frac{\mathfrak{L}^2}{2a^2} + \frac{3\mathfrak{L}^4}{16a^4} + \dots\right).$$

In der zweiten Hauptlage, wo der Einheitspol seitlich von de
Stabe N'S' liegt, übt dieser eine Kraft P' aus, für welche gilt:

$$P' = \frac{M}{a^3}\left(\frac{1}{1 + \frac{1}{4}\mathfrak{L}^2/a^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{oder} \quad P' = \frac{M}{a^3}\left(1 - \frac{3}{8}\frac{\mathfrak{L}^2}{a^2} + \frac{15}{128}\frac{\mathfrak{L}^4}{a^4} + \dots\right).$$

Sieht man von den Ausdrücken in der Klammer ab, die bei groß
Entfernung wegfallen, so ist die Wirkung in der ersten Hauptlage doppe
so groß wie in der zweiten.

Es befinde sich nun in C die Nadel des Magnetometers, die unt
passender Anordnung der magnetischen Bank entweder aus erster od
aus zweiter Hauptlage durch den Magnetstab vom Moment M abgelenl
wird. Indem die Entfernungen a so groß gewählt werden, daß die Korrel
tionsglieder in der Klammer bis auf das erste zu vernachlässigen sind, läß
man den Stab aus den Entfernungen a_1 und a_2 wirken, denen die Al
lenkungen φ_1 und φ_2 entsprechen mögen. Jeder Winkel φ ist das Mitt

Magnetometers gebracht und in jeder Lage noch um 180° gedreht wird. Bezeichnet $\mathfrak{H}$ die Feldstärke, so ergibt sich für die erste Hauptlage: $\frac{1}{2} a_1^5 \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{M}{\mathfrak{H}} (a_1^2 + \eta)$ und $\frac{1}{2} a_2^5 \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{M}{\mathfrak{H}} (a_2^2 + \eta)$ Hieraus folgt

$$\frac{M}{\mathfrak{H}} = \frac{1}{2} \frac{a_2^5 \operatorname{tg} \varphi_2 - a_1^5 \operatorname{tg} \varphi_1}{a_2^2 - a_1^2} \quad \text{und} \quad \eta = a_1^2 a_2^2 \frac{a_1^3 \operatorname{tg} \varphi_1 - a_2^3 \operatorname{tg} \varphi_2}{a_2^5 \operatorname{tg} \varphi_2 - a_1^5 \operatorname{tg} \varphi_1}.$$

Die Größe η braucht für denselben Stab nur einmal bestimmt zu werden. Dann genügt die Ablenkung aus einer Entfernung und die Berechnung nach der Formel $\mathfrak{Q} = \frac{M}{\mathfrak{H}} = \frac{1}{2} \frac{a_1^3 \operatorname{tg} \varphi_1}{1 + \eta / a_1^2}$, wo $\eta = \frac{1}{2} \mathfrak{L}^2 - \frac{3}{4} \mathfrak{l}^2$, wenn $\mathfrak{l}$ den Polabstand der Magnetometernadel bezeichnet.

Bei der zweiten Hauptlage fällt der Faktor $^1/_2$ weg; ferner ist $\eta = -\frac{3}{8} \mathfrak{L}^2 + \frac{3}{2} \mathfrak{l}^2$.

Für kurze Magnete hat KOHLRAUSCH abgeänderte Formeln[1]) angegeben, die besonders für kleine Entfernungen geeigneter sind.

Zur Ermittlung von $\mathfrak{H}$ bedarf es außer des Quotienten $M/\mathfrak{H}$ noch des Produkts $M\mathfrak{H}$. Zu seiner Messung legt man den ablenkenden Magnetstab in ein mit Spiegel versehenes Schiffchen, das an einem Faden hängt, und beobachtet die Schwingungsdauer T. Bezeichnet K das Trägheitsmoment und Θ das Torsionsmoment, so erhält man $\mathfrak{P} = M'\mathfrak{H} = \frac{\pi^2 K}{T^2 (1 + \Theta)}$. Wir schreiben jetzt M' für das magnetische Moment, da es sich etwas von dem Moment M während der Ablenkungsversuche unterscheidet. Denn jetzt erfährt das Moment durch die Induktion des Erdfeldes eine Vergrößerung, so daß $M' = M (1 + \delta)$. Es ist demnach $\mathfrak{H} = \sqrt{\frac{\mathfrak{P}}{\mathfrak{Q}(1+\delta)}} = \left(1 - \frac{1}{2}\delta\right) \sqrt{\frac{\mathfrak{P}}{\mathfrak{Q}}}$. Auf die Messung von δ wird an anderer Stelle (S. 297) eingegangen, diejenige von K siehe S. 58.

Fig. 178. Bifilarmagnetometer.

Statt die Schwingungsdauer des Magnetstabes zu messen, legt KOHLRAUSCH[2]) ihn in ein bifilar aufgehängtes Schiffchen (Fig. 178) und beobachtet dessen Ablenkung. Bezeichnen d_1 und d_2 den unteren und oberen Abstand der Fäden, h ihre Länge, ferner m die angehängte Masse

---

[1]) F. KOHLRAUSCH, Wied. Ann. 31, 613. 1887.

[2]) F. KOHLRAUSCH, Wied. Ann. 17, 737. 1882. — Eine in weiten Grenzen veränderliche bifilare Aufhängung mit Quarzfäden s. bei BENEDICKS, ZS. f. Instr.

und g die Beschleunigung der Schwere, so ist die Direktionskraft der Aufhängung $D = \frac{1}{4} g m d_1 d_2/h$. Zunächst wird die Fadenebe[illegible] ostwestlich gerichtet, dann der Magnetstab eingelegt und die Ablenku[illegible] mit Spiegel und Skala beobachtet, was man wiederholt, nachdem d[illegible] Stab umgedreht ist. Ist α das Mittel aus beiden Ablenkungswinkel[illegible] so folgt $M \mathfrak{H} = D \operatorname{tg} \alpha$. Zur Bestimmung von $M/\mathfrak{H}$ wirkt der Stab [illegible] seiner Aufhängung gleichzeitig in zweiter Hauptlage auf ein Magnet[illegible]meter, das man nördlich und südlich in der Entfernung a aufstellt. Ma[illegible] spart gegenüber dem GAUSSschen Verfahren die Bestimmung des Trä[illegible]heitsmoments und des Induktionskoeffizienten. Dafür ist die Direktion[illegible]kraft der bifilaren Aufhängung aus den Al[illegible]messungen und dem Gewicht zu ermitteln.

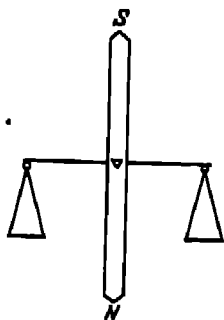



Fig. 179. Wagemagnetometer.

Nach A. TÖPLER (1884) wird das Produkt M[illegible] durch Wägung gemessen[3]). Der senkrechte Ma[illegible]netstab NS (Fig. 179) schwingt mit einer in sein[illegible] Mitte befestigten wagerechten Schneide auf de[illegible] ebenen Achatlager einer Wage. Er trägt eine[illegible] leichten Balken mit kleinen Schalen, welche di[illegible] Gewichte aufnehmen. Man bringt die Schwingung[illegible]ebene in den magnetischen Meridian und stellt da[illegible] Gleichgewicht her. Darauf wird das ganze System[illegible] die Tragsäule des Achatlagers mit dem Schutz[illegible]kasten, um eine senkrechte Achse um 180° gedreht. Muß nun das Ge[illegible]wicht auf einer Seite um m Gramm geändert werden, damit sich da[illegible] Gleichgewicht wieder einstellt, und wirkt es an einem Hebelarm von l cm Länge, so ist $M \mathfrak{H} = \frac{1}{2} g l m$, wo g die Beschleunigung der Schwer[illegible] bezeichnet.

b) Vergleichung an verschiedenen Orten. Um das Erd[illegible]feld an verschiedenen Orten zu vergleichen, kann man mit einem Magnetstabe Schwingungsbeobachtungen an den Stellen nacheinande[illegible] ausführen. Einfacher und schneller jedoch lassen sich Ablenkungs[illegible]versuche anstellen, wobei derselbe Stab auf ein Magnetometer ein[illegible]wirkt. Für diesen Zweck besonders geeignete Lokalvariometer ha[illegible] KOHLRAUSCH angegeben. Das empfindlichere[4]) (Fig. 180) besitz[illegible] einen beiderseits polierten Stahlspiegel, der magnetisiert an einem Faden in einem Kupferdämpfer hängt, und eine Ablenkung von nahez[illegible] 180° erfährt, so daß das Skalenbild in das mit dem Instrument ver[illegible]bundene Fernrohr nacheinander von beiden spiegelnden Flächen ge[illegible]worfen wird. Man geht hierbei von der ostwestlichen Stellung der Nade[illegible]

[3]) J. FREYBERG, Wied. Ann. 25, 511. 1885.

aus und lenkt mit einem Rahmen ab, der vier kleine Magnete trägt und wie der Kreis eines Theodoliten an einer Teilung um meßbare Beträge gedreht wird. Das Feld, das diese vier Magnete am Orte der Nadel erzeugen, soll etwas größer als das Erdfeld sein, und der Winkel, um den der Rahmen zu drehen ist, um eine Ablenkung von nahezu 180° hervorzubringen, wird durch Anschläge begrenzt. Beträgt der Unterschied der Skaleneinstellung, wenn der Rahmen um den Winkel 2 φ gedreht wird, am ersten Beobachtungsorte n und am zweiten n′ Skalenteile, so erhält man für das Verhältnis der Feldstärken $\frac{\mathfrak{H}'}{\mathfrak{H}} = 1 + \frac{n' - n}{4A} \operatorname{tg} \varphi$, wo A den Abstand des Spiegels von der Skale bezeichnet.

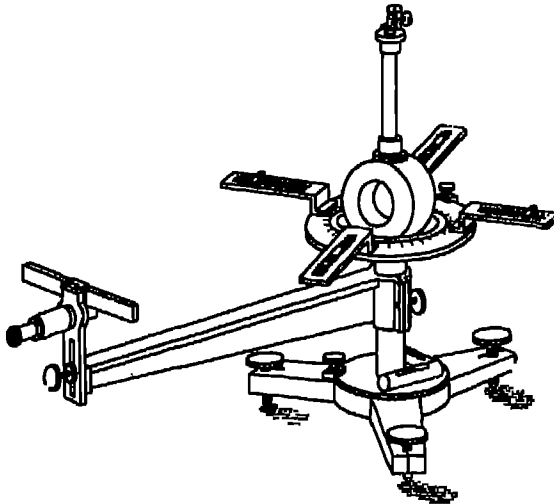
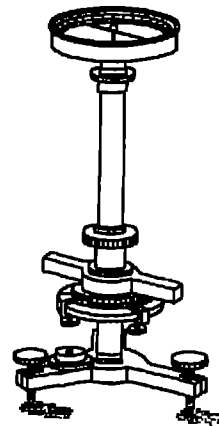



Fig. 180 Lokalvariometer. Fig. 181.

Bei einem einfacheren Instrument[5]) (Fig. 181) ist das Magnetometer durch eine Bussole, der Rahmen mit den vier Magneten durch einen Magnetstab ersetzt, der an dem Träger der Bussole unter ihr verschiebbar und drehbar ist Mit dieser Vorrichtung läßt sich noch ein Unterschied von 1‰ in der Feldstärke messen.

c) Zeitliche Schwankungen Die zeitlichen Änderungen des Erdmagnetismus zu verfolgen ist Aufgabe der erdmagnetischen Observatorien[6]). Doch kommt auch der Physiker in die Lage, diesen Änderungen Rechnung tragen zu müssen, deshalb seien hier die für ihn zweckmäßigen Instrumente angeführt.

[5]) F. Kohlrausch, Wied. Ann. 20, 47. 1883.

[6]) A. Schmidt, ZS. f. Instr. 1907, 137 (Variationsinstrumente des Seddiner

Schwankungen der Deklination werden an dem Magnetometer beobachtet. Damit die Vergleichung über längere Zeiträume ausgeführt werden kann, hat man Lokaleinflüsse fernzuhalten und die unveränderliche Stellung des Ablesefernrohrs an einer festen Mire zu prüfen.

Die Änderungen der horizontalen Feldstärke müssen unabhängig von den Schwankungen der Deklination verfolgt werden. Deshalb wird die Nadel auf etwa $^1/_2{}^\circ$ genau senkrecht zum Meridian gestellt. GAUSS (1841) benutzte hierzu die bifilare Aufhängung, die Ablenkung eines Unifilars aus dem Meridian kann aber auch durch die Torsion des Fadens oder durch Magnete geschehen[7]) wie bei den Lokalvariometern. Die Empfindlichkeit E, d. h. die Änderung der Feldstärke, welche einem Skalenteil entspricht, bestimmt man aus der Ablenkung, welche ein Magnet von bekanntem Moment M im Abstand a südlich oder nördlich von der Nadel hervorruft Wird bei Umlegung dieses Magnets eine Bewegung des Skalenbildes von n Teilen hervorgerufen, so ist $E = \frac{4}{a^3 n}\,\frac{M}{\mathfrak{H}}$.

Hat das Bifilar einen Torsionskreis, so läßt sich auch so verfahren, daß man die Nadel in ihrem Schiffchen umlegt und den Kreis dreht, bis wieder derselbe Skalenteil einsteht. Beträgt der Drehwinkel $2\,\alpha$, so ist $E = \frac{\operatorname{ctg}\alpha}{2\,A}$, wo A den Abstand zwischen Spiegel und Skale bezeichnet Denn es ist $\mathfrak{H}\,M\,(1 + E) = D \sin\left(\alpha + \frac{1}{2\,A}\right) = D\left(\sin\alpha + \frac{1}{2\,A}\cos\alpha\right)$. Die Empfindlichkeit ist von der Temperatur abhängig, weil diese das Moment M der Nadel beeinflußt.

Schwankungen der senkrechten Feldkomponente werden gewöhnlich mit einem Magnet beobachtet, der wie ein Wagebalken auf Schneiden schwingt (LLOYD 1838).

Ein torsionsfrei aufgehängter Magnet stellt sich mit seiner magnetischen Achse in die Richtung des magnetischen Meridians. Diese braucht nicht mit der geometrischen Achse zusammenzufallen. Man dreht deshalb den Magnet um seine Längsachse in dem Schiffchen um 180° und nimmt das Mittel aus beiden Einstellungen. Das Fernrohr, mit welchem die absolute Deklination, d. h der Winkel zwischen dem magnetischen und astronomischen Meridian, gemessen werden soll, wird entweder auf einen Spiegel eingestellt, der senkrecht zur magnetischen Achse befestigt ist, oder auf eine mit dem Magnet verbundene Linse, in deren Brennpunkt sich eine Skale befindet. In letzterem Falle wird zweckmäßig ein Röhrenmagnet verwandt Man beobachtet zunächst den Winkel zwischen dem magnetischen Meridian und einer terrestrischen

7) [illegible]

Marke, z. B. einer Kirchturmspitze, deren Azimut alsdann nach einem der astronomischen Verfahren zu messen ist.

Zur Bestimmung der Inklination, des Winkels, welchen die Richtung des Erdfeldes mit der Horizontalen bildet, dient das Inklinatorium, welches keine so große Genauigkeit zuläßt wie die Messung der Deklination. Auf ein genaueres indirektes Verfahren werden wir später eingehen.

d) Elektrische Messung. Die Messung elektrischer Einheiten in absolutem Maß beruht zum Teil auf der absoluten Bestimmung der erdmagnetischen Feldstärke. Umgekehrt kann man diese natürlich aus elektrischen Größen ableiten, so z. B. mit der Tangentenbussole aus der elektrischen Stromstärke. Für genaue Messungen bedient man sich dabei der HELMHOLTZ-GAUGAINschen Anordnung und rückt die Magnetnadel um $\frac{1}{2}$ r aus der Ebene des Drahtringes. Auf diesen Grundlagen sind besondere Instrumente gebaut worden, mit denen die Bestimmung des Erdfeldes auf eine Strommessung zurückgeführt ist (WATSON 1902).

Bei dem SMITHschen Apparat[8]) ist ein Marmorzylinder von 37 cm Länge und 61 cm Durchmesser, dessen Achse horizontal liegt, um eine vertikale Achse drehbar auf einem Dreifuß angeordnet. Er trägt an seinen beiden Enden die Drahtspulen, die in einer Lage aufgewickelt sind, und besitzt in der Mitte eine Aussparung für das Magnetometer, dessen Nadel an einem Quarzfaden hängt. Zwei einzelne konaxiale Windungen vom Radius r, um r voneinander entfernt, bringen in ihrer Mitte ein Feld $\mathfrak{H}_x$ hervor, das für die CGS-Einheit der Stromstärke dargestellt ist durch $\mathfrak{H}_x = \frac{4\pi r^2}{\left(r^2 + \frac{r^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{6{,}4\pi}{r\sqrt{5}} = \frac{8{,}991\,76}{r}$

Diese axiale Feldstärke ist in einer Kugel vom Radius $\frac{1}{10}$ r konstant auf $1 \cdot 10^{-5}$ [9]) und ändert sich mit der Temperatur proportional der linearen Ausdehnung des Marmorträgers, die $7{,}9 \cdot 10^{-6}$/Grad beträgt.

Die Stromstärke i wird durch Kompensation der Spannung an einem Normalwiderstande mit dem Westonelement bestimmt. Die Spulen werden zunächst so gedreht, daß die Achse ihres Feldes $\mathfrak{H}_x$ mit dem Erdfelde $\mathfrak{H}$ zusammenfällt, die Magnetnadel also keine Ablenkung erfährt, wenn der Stromkreis geöffnet oder geschlossen wird. Darauf wird der Spulenträger so weit gedreht, daß sich die Magnetnadel in die Richtung n s genau senkrecht zum Meridian N S stellt, nachdem noch der Torsionskreis um 90° nachgedreht ist. Durch

Fig. 182. Elektrische Feldmessung.

[8]) F. E. SMITH, Phil. Trans. A 223, 175, 1923.

eine zweite Drehung wird zuletzt die Nadel in die entgegengesetzte Lage gebracht, nachdem man mit dem Torsionskreis um 180° gefolgt ist. Ist der erste Winkel zwischen Spulenachse und Meridian α, der zweite β, wobei $\mathfrak{H}_x i > \mathfrak{H}$ vorausgesetzt wird, so folgt $\mathfrak{H} = \frac{1}{2} \mathfrak{H}_x i (\cos\alpha + \cos\beta)$. i wird so abgeglichen, daß α und β kleine Winkel (bis etwa 5°) sind, so daß $\cos\alpha$ und $\cos\beta$ der Einheit naheliegen.

Um die Drehungen der Nadel um 90° usw. genau einhalten zu können, ist der Apparat mit sechs Hohlspiegeln versehen, wovon einer mit der Nadel, ein zweiter mit dem Marmorzylinder und die vier anderen mit dem Nadelgehäuse verbunden sind. Drei Lichtspalte erzeugen Bilder auf einer kreisförmigen Skale von 2 m Radius, die 90° auseinander liegen.

Beides, Stromstärke und Feldstärke, folgen aus der gleichzeitigen Beobachtung der Tangentenbussole und des Bifilargalvanometers, die beide von demselben Strome durchflossen werden. Das letztere, mit dem W. WEBER (1840) zuerst das elektrochemische Äquivalent des Silbers bestimmte, besteht aus einer ringförmigen Spule, die an ihren Zuleitungsdrähten im Erdfelde bifilar so aufgehängt wird, daß die Windungsfläche in den magnetischen Meridian fällt. Ist F die gesamte Windungsfläche, so erfährt die Spule bei der Stromstärke I unter dem Einfluß der Feldstärke $\mathfrak{H}$ das Drehmoment $F \mathfrak{H} I \cos\varphi$, wenn sie um den Winkel φ abgelenkt wird. Die Direktionskraft D läßt sich aus den Abmessungen der bifilaren Aufhängung oder aus Schwingungsdauer und Trägheitsmoment bestimmen. Lenkt nun derselbe Strom I eine Tangentenbussole mit N Windungen vom Radius r um den Winkel α ab, so ergibt sich[10] $\mathfrak{H}^2 = \frac{D}{F} \frac{2\pi N}{r} \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\alpha}$ und $I^2 = \frac{D}{F} \frac{r}{2\pi N} \operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\varphi$. Die Winkel φ und α werden unter Wendung der Stromrichtung abgelesen, und $\operatorname{tg}\alpha$ ist mit dem Faktor $(1+\Theta)$ wegen der Torsion des Aufhängefadens zu multiplizieren.

Statt der Tangentenbussole kann man ein Magnetometer benutzen, auf daß die Bifilarspule ablenkend einwirkt. Man stellt also z. B. im Abstande a östlich oder westlich von ihr ein Magnetometer mit kurzer Nadel auf, die der Strom I um ψ ablenke, während die Bifilarspule die Ablenkung φ erfahre. Man erhält alsdann[11] $\mathfrak{H} \operatorname{tg}\psi = 2 F I \cos\varphi (a^2+r^2)^{-\frac{3}{2}}$, $\operatorname{tg}\varphi = F \mathfrak{H} I/D$ und $\mathfrak{H}^2 = \frac{2D}{(a^2+r^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{\sin\varphi}{\operatorname{tg}\psi}$, $I^2 = \frac{(a^2+r^2)^{\frac{3}{2}}}{2F^2} \frac{\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\psi}{\cos\varphi}$. Für die zweite Hauptlage, wo das Magnetometer nördlich oder südlich von der Bifilarspule steht, wird der Term $\frac{1}{2}(a^2+r^2)^{\frac{3}{2}}$ durch $a^3\left(1 - \frac{9}{8}\frac{r^2}{a^2}\right)$

[10]) F. KOHLRAUSCH, Pogg. Ann. 138, 1 1869

ıetzt. Auch hier ist noch die Fadentorsion zu berücksichtigen, also ψ mit $(1 + \Theta)$ zu multiplizieren. An die Stelle des einen Magneto-ıters, das abwechselnd auf die eine und die andere Seite gestellt wird, ınnen zwei feste Instrumente treten, deren Abstand gleich $2a$ zu tzen ist.

2. Die Feldstärke der Stromspule.

a) Absolute Messung. Mit Stromspulen lassen sich magnetische ılder bis 1000 Gauß, mit Kühlung bis 1500 Gauß erzeugen.

Eine im Verhältnis zu ihrer Länge enge Spule, deren gleichmäßige ıcklung n Windungen auf dem Zentimeter besitzt und vom Strome I npere durchflossen wird, weist weit genug von ihren Enden im Innern e Feldstärke $\mathfrak{H} = 0{,}4\,\pi n I$ Gauß auf. Allgemein ist in einem Punkte ır Achse einer Spule von der Länge l und dem Radius r, der um a vom ıde entfernt ist, $\mathfrak{H} = 0{,}2\,\pi n I \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{l - a}{\sqrt{(l - a)^2 + r^2}}\right)$; also in der itte oder am Ende $\mathfrak{H} = \frac{0{,}4\pi I l n}{\sqrt{l^2 + 4r^2}}$ oder $\frac{0{,}2\pi I l n}{\sqrt{l^2 + 4r^2}}$.

Nach außen wirkt die Spule wie ein Magnet, dessen Endflächen mit ıiem Magnetismus von der Flächendichte $0{,}1\,n I$ belegt sind.

Legt man um eine solche lange Spule in der Mitte eine kurze Spule ın N Windungen derart, daß die gesamten Kraftlinien alle N-Windungen hneiden, so bewirkt das Entstehen oder Verschwinden des Feldes das ıtegral der EMK: $\int E\,dt = r^2 \pi \mathfrak{H} N$, wo r den mittleren Radius ır primären Spule bedeutet; wenn diese k Lagen besitzt, ist $= (r_1^2 + r_2^2 + \ldots)/k$. Bildet die sekundäre Spule mit einem ballistischen ılvanometer einen Stromkreis vom Widerstand R, so erhält man für e hindurchfließende Elektrizitätsmenge Q die Beziehung $Q = \frac{1}{R}\int E\,dt$.

Als Grundmaß für die Feldstärke benutzt man ebenso wie für die ıduktivität Normalspulen, deren Windungen in einer schrauben-rmigen Nute auf einen Marmorkern gewickelt sind, so daß sich das ıld $\mathfrak{H}$ genau berechnen läßt. Auch werden wohl Rohre aus Hartgummi ler Glas als Träger benutzt, die den Vorteil gewähren, daß die Sekundär-ıule auch in das Innere geschoben werden kann. Besitzt eine solche e Windungsfläche F und entsteht in einem mit der Spule verbundenen ıllistischen Galvanometer der Ausschlag α, wenn das Feld entsteht oder ırschwindet, so ist $C\alpha = \mathfrak{H}/F$, wo, wenn R den Widerstand des Gal-ınometerkreises und $\mathfrak{C}$ den ballistischen Reduktionsfaktor (S. 253)

Für die Messung starker Felder, die meistens eine geringe Ausdehnu besitzen, werden Probespulen von einer Windung benutzt, die man das Feld hineinstößt oder daraus entfernt. Auch eine Drehung u 180°, die den doppelten Ausschlag liefert, ist oft bequem. Um d Bestimmung von Dämpfung und Widerstand des Galvanometers übe hoben zu sein, kann man die Sekundärwindungen der Normalspule ste im Galvanometerkreis belassen.

b) Vergleichung mit dem Erdfeld. Für die Erzeugu schwacher Felder in der Induktionsspule wird an Stelle der Stromspu auch das Erdfeld benutzt. Stehen die Windungen der mit dem bal stischen Galvanometer verbundenen Induktionsspule senkrecht zu magnetischen Meridian, so beobachtet man bei ihrer Drehung um 18(das Integral 2 $\mathfrak{H}$ F.

W. Weber (1853) hat hierauf ein Verfahren zur Bestimmung d Inklination gegründet. Sein Erdinduktor besteht aus einer Spule, d um eine in die Windungsebene fallende Achse gedreht werden kan Beides, Spule und Achse, sitzen in einem Holzrahmen, der seinersei wiederum um eine zu der ersten senkrechten Achse zu drehen ist, so da die Windungsebene einmal senkrecht, das andere Mal horizontal z stellen ist. In der ersten Lage induziert die horizontale Komponent des Erdmagnetismus, in der zweiten die vertikale. Sind die entspreche den ballistischen Ausschläge α_h und α_v, so ist $\operatorname{tg} i = \alpha_v/\alpha_h$.

Für die Inklinationsmessung ist es genauer, die Drehungsachse nicl vertikal und horizontal zu stellen, sondern sie in zwei der Inklinatio nahe Richtungen zu bringen und aus den Ausschlägen diejenige Stellun zu interpolieren, wo kein Ausschlag erfolgt. Die Neigung der Achsen i den beiden Beobachtungslagen wird an einem Vertikalkreis abgelese (Schering 1882).

Auch läßt sich das Erdfeld auf das Spulenfeld zurückführen. Wi haben schon gesehen (S. 283), wie das erstere mit dem Felde einer Helm holtz-Gaugainschen Spule verglichen wird. In anderer Weise verfäh man, indem ein Magnetstab in einer Stromspule aufgehängt und sein Schwingungsdauer beobachtet wird, und zwar einmal, wenn das Erdfel durch das Spulenfeld $\mathfrak{H}'$ verstärkt, sodann wenn beide einander entgegen wirken. Die Achse der Spule wird dabei natürlich in den Meridian gestell Sind die entsprechenden Schwingungsdauern, korrigiert wegen de Torsion der Aufhängung, T_1 und T_2, so ergibt sich $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{\mathfrak{H}+\mathfrak{H}'}{\mathfrak{H}-\mathfrak{H}'}$, woraus sich $\mathfrak{H}$ berechnen läßt, wenn $\mathfrak{H}'$ aus der Stromstärke und Win

Infolge des Wechsels der Feldstärke ändert sich das induzierte Moment des Magnets, was eine geringe Korrektion erfordert. Wenn der Induktionskoeffizient des schwingenden Magnets vom Moment M, d. h. das Verhältnis des vom Erdfeld $\mathfrak{H}$ induzierten Moments m zu M, mit $\varDelta$ bezeichnet wird, wo $\varDelta$ also $= m/M$ und $m = c\,\mathfrak{H}$, so ergibt sich[12])

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' \frac{T_1^2 + T_2^2}{T_1^2 - T_2^2} \left\{ 1 + \left(1 - \left(\frac{\mathfrak{H}'}{\mathfrak{H}} \right)^2 \right) \varDelta \right\}.$$

c) **Vergleichung von Windungsflächen.** Die Windungsfläche einer Stromspule, deren Bestimmung schon S. 265 behandelt wurde, läßt sich auch durch die Fernwirkung auf eine Magnetnadel mit einer ausgemessenen Stromfläche, z. B. mit dem Ring einer Tangentenbussole, vergleichen. Fließt derselbe Strom durch diese und die zu vergleichende Spule mit der Windungsfläche F, die ostwestlich in der ersten Hauptlage in der Entfernung a stehen soll, so erfährt die Nadel vom Momente M durch den Bussolenring vom Halbmesser r und die Spule die Drehungsmomente:

$$\frac{2\pi I M}{r} \cos\varphi \qquad \text{und} \qquad \frac{2 F I M}{a^3} \cos\varphi$$

und vom Erdfelde und der Aufhängung: $- C M \sin\varphi$. Bezeichnet man mit φ und φ' die Ablenkungen der Nadel, wenn Tangentenbussole und Spule in gleichem oder ungleichem Sinne wirken, so folgt

$$I\left(\frac{2F}{a^3} + \frac{2\pi}{r}\right) = C \operatorname{tg}\varphi\,, \quad I\left(\frac{2F}{a^3} - \frac{2\pi}{r}\right) = C \operatorname{tg}\varphi' \quad \text{und} \quad F = \frac{a^3\pi}{r} \frac{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\varphi'}{\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi'}.$$

Befindet sich die Spule in der zweiten Hauptlage, so tritt auf der rechten Seite der Faktor 2 hinzu. Streng gilt die Gleichung nur, wenn das Quadrat der Spulenabmessungen klein gegen den Abstand a ist. Andernfalls kommt eine Korrektion hinzu, die von dem Polabstand der Nadel und dem inneren und äußeren Durchmesser der Spule abhängt[13]).

Oft wird es zweckmäßig sein, eine Nullmethode anzuwenden, indem man die Entfernungen passend wählt oder den Strom durch einen geeigneten Verzweigungswiderstand zwischen Tangentenbussole und Spule teilt.

3. Starke magnetische Felder.

Zur Erzeugung starker Felder werden Magnete verwendet, und zwar meistens Elektromagnete, womit Feldstärken bis 55 000 Gauß erreicht wurden. So starke Felder sind freilich nur in engen Schlitzen der größten Elektromagnete möglich. Für diese ist neuerdings die ursprünglich von RUHMKORFF (1846) eingeführte viereckige Form wieder in Aufnahme

---

[13]) E. MAUZ, Phys. ZS. 1921, 11.

gekommen[14]), da die Ringmagnete[15]) keine Vorteile bieten, die im Verhältnis zu ihrer schwierigeren Herstellung stehen. Die Polstücke werden kegelförmig gestaltet und tragen die Stromspulen, die sowohl wegen der Durchschlagssicherheit als auch wegen der Kuhlung unterteilt werden. Als Kühlmittel dient Wasser, das durch Röhren strömt, oder Luft, die ein elektrisch betriebener Ventilator in Bewegung setzt. Für die höchsten Feldstärken werden Polstücke aus Ferrokobalt verwandt.

a) Induktionsspule Starke Felder bestimmt man meistens mit Induktionsspulen, die nur eine Windung besitzen. Diese werden mit Normalspulen verglichen oder zweckmäßiger mit Feldern, welche von derselben Größenordnung sind wie die zu messenden. GANS[16]) hat dafür geschlitzte Eisenjoche mit mäßig breitem Luftspalt vorgeschlagen (Fig 183), deren Induktion proportional dem Magnetisierungsstrome ansteigt. Mit zwei solchen Jochen lassen sich Felder von 3000 bis 6000 Gauß herstellen.

Fig 183. Eisenjoch zum Messen der Feldstärke.

Fig. 184. Feldwage.

b) Bifilargalvanometer. Das Drehmoment, das ein Feld auf eine Stromspule ausübt, läßt sich mit dem Bifilargalvanometer messen[17]). Die kleine Spule mit einer Windung hängt an zwei Drähten, welche den Strom zuführen, durch dessen Stärke die Empfindlichkeit verändert werden kann. Aus der Direktionskraft D der Aufhängung (S. 279), der Stromstärke I, der Windungsfläche F und der Ablenkung φ der Spule, deren Windungsebene der horizontal gerichteten Kraft parallel gestellt wird, folgt für die Feldstärke $\mathfrak{H} = \frac{D}{F I} \operatorname{tg} \varphi$.

Die bifilare Aufhängung kann auch durch die Torsion eines Aufhängedrahts (die Umkehrung des Galvanometers von DEPREZ und D'ARSONVAL) oder durch Wägung ersetzt werden. Das letztere Verfahren ist besonders für Felder von geringer Ausdehnung ausgebildet (COTTON 1900).

[14]) P WEISS, C. R. 156, 1970. 1913. — THE SVEDBERG, Ann. Phys. 52, 657. 1917. — H. BOAS u. Th. PEDERZANI, ZS. f. Phys. 19, 351. 1923.

[15]) H. DU BOIS, Ann. Phys. 42, 903 u. 953. 1913; 51, 577. 1916.

[16]) R. GANS u. P GMELIN, Ann. Phys. 28, 925. 1909.

c) **Wägung.** Ein geradliniges, vom Strom I CGS durchflossenes Leiterelement von der Länge l cm, welches senkrecht zu den Kraftlinien verläuft, erfährt eine Gewichtsvermehrung $m = \mathfrak{H} l I/981$ Gramm, so daß $\mathfrak{H} = \frac{981\,m}{I\,e}$. Man kann entweder einen konstanten Strom I anwenden und die Wage durch das Gewicht m abgleichen oder wohl bequemer umgekehrt. An dem einen Wagebalken ist ein Leiterviereck befestigt, dem der Strom von der Achse zugeführt wird (Fig. 184); die Seiten A D und B C erfahren als Kreisbogen keine Wirkung, ebensowenig C D, weil es außerhalb des Feldes bleibt. Es kommt also nur die Strecke A B in Frage, die radial und senkrecht zu den Kraftlinien verläuft. Bei einem Modell von COTTON und WEISS beträgt seine Länge 2 cm, so daß für $\mathfrak{H} = 10\,000$ und $I = 0{,}1$ CGS das Gleichgewicht der Wage durch 2 g hergestellt wird[18])

d) **Durchbiegung eines Stromleiters.** Ferner bestimmt man die Feldstärke aus der Durchbiegung eines gespannten Stromleiters, wobei SCHRÖTER[19]) einen Silberstreifen SS (Fig. 185) von 0,01 mm Dicke, 1 mm Breite und 50 mm Länge benutzte. Dieser ist mit seinen Enden an Kupferfedern K K befestigt, die den Strom zuleiten. Der Ausschlag wird dadurch konstant gehalten, daß die Mitte des durchgebogenen Silberbandes einen festen Nadelkontakt berührt, was mit einem Telephon T überwacht wird, das auf den Strom eines kleinen Induktoriums J zum Ansprechen kommt, während die Stärke des im Bande fließenden Stroms mit dem Widerstand R passend geregelt und mit dem Strommesser A bestimmt wird. Man eicht den Apparat in dem gleichmäßigen Felde einer langen Spule, deren Feldstärke, in Abhängigkeit von der reziproken Stromstärke des Bandes aufgetragen, eine Gerade darstellt, und für größere Feldstärken in dem Luftspalt eines Elektromagnets.

Fig. 185. Biegsamer Stromleiter.

e) **Flüssiger Stromleiter.** Statt des biegsamen Silberbandes ist auch ein stromdurchflossener Quecksilberstrahl verwandt worden. Er tritt mit einer horizontal gerichteten Geschwindigkeit in das Feld, und die Stromstärke I wird so abgeglichen, daß er keine Ablenkung von der ursprünglichen Richtung erfährt. In diesem Falle ist (in CGS-Einheiten)

18) [illegible]

$\mathfrak{H} I = 981 F s$, wo s die Dichte und F den Querschnitt des Strahls bedeuten[20])

Nach einem älteren Meßverfahren (LEDUC 1887) füllt man das Quecksilber in eine Kammer mit isolierenden Wänden, die in der Feldrichtung schmal (in Fig. 186 von vorn nach hinten) ist und in der Länge vom Strome I durchflossen wird. Durch die elektrodynamische Wirkung entsteht in den Ansatzrohren R_1 und R_2 ein Niveauunterschied, dem der Überdruck p entsprechen möge. Dann gilt $\mathfrak{H} I = d\,p$, wo d (in cm) die schmale Seite der Kammer bedeutet[21]).

f) Steighöhe magnetischer Flüssigkeiten Wegen ihrer Einfachheit empfiehlt sich die Methode, die Feldstärke aus der Steighöhe schwach magnetischer Flüssigkeiten zu bestimmen. Man füllt sie in ein U-Rohr mit einem weiten und einem engen Schenkel und bringt die Kuppe des letzteren, des Steigrohrs, in das Feld. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird das Steigrohr geneigt. Aus der Steighöhe folgt $\mathfrak{H} = C\sqrt{h}$, wo $C = \sqrt{2gs/\varkappa}$, also aus Dichte s und Suszeptibilität $\varkappa$ der Flüssigkeit berechnet werden kann. Für eine konzentrierte Eisenchloridlösung ist $C = 6000$, wenn h in cm ausgedrückt wird. Gebraucht wird vielfach eine halbkonzentrierte Lösung von Nickelsulfat[22]).

Fig. 186. Quecksilber als Stromleiter im Felde.

g) HALL-Effekt. Ein ebenes Metallblech von der kleinen Dicke d stehe senkrecht zu den Kraftlinien in einem magnetischen Felde $\mathfrak{H}$ und werde der Länge nach von dem Strome I durchflossen Dann entsteht senkrecht zur Stromrichtung in dem Blech eine EMK, die $\mathfrak{H}$ proportional ist, also $\mathfrak{H} = \frac{E\,d}{C\,I}$. E wird in der Mitte der langen Blechseiten durch Elektroden abgenommen, die mit dem Blech aus einem Stück geschnitten sind. Alle Größen in CGS ausgedrückt, gilt bei 18° für $C \cdot 10^4$:

Pt	− 2,0	Pd	− 0,8	Cd	+ 5,0
Al	− 3,5	Au	− 7,0	Zn	+ 0,4
Cu	− 5,2	Ag	− 8,2		

Bei den ferromagnetischen Metallen wächst E proportional der Magnetisierung (KUNDT 1893)[23]).

h) Wismutspirale. Die Änderung, die der elektrische Widerstand des Wismuts im magnetischen Felde erfährt, haben LENARD und HOWARD

[20]) G. SCHMALTZ, ZS f. Phys. 35, 22. 1925.
[21]) H. DU BOIS, Wied. Ann. 35, 142. 1888
[22]) [illegible]

(1888) zu einem brauchbaren Verfahren der Feldmessung ausgebildet: der dünne gespritzte Draht hat die Form einer ebenen, bifilaren Spirale die zwischen Glimmerblätter gekittet wird (HARTMANN & BRAUN). Der Widerstand beträgt etwa 10 Ohm, die Dicke noch nicht 1 mm. Die Ebene wird senkrecht zu den Kraftlinien in das Feld gebracht.

Die Widerstandsänderung hängt stark von der Temperatur ab, wächst in schwachen Feldern beschleunigt, von etwa $\mathfrak{H} = 10\,000$ Gauß an gleichförmig Unterhalb dieser Feldstärke wird das Verfahren wenig benutzt. Die Eichung jeder einzelnen Spule ist nicht zu umgehen[24]). Für Wechselfelder ist das Verfahren wegen der Trägheit, mit der sich die Änderung vollzieht, nicht anwendbar[25])

i) Drehung der Polarisationsebene Bei optischen Beobachtungen wird auch von dem ZEEMAN-Effekt und der Drehung der Polarisationsebene in Flintglas und Flüssigkeiten zur Feldmessung Gebrauch gemacht. Die Drehung in einer Schicht von 1 cm, die sich in dem Felde von 1 Gauß befindet, heißt VERDETsche Konstante. Sie beträgt bei Na-Licht für Schwefelkohlenstoff 0,04347′ (1 — 0,001 696 t), für Wasser 0,01311′ $(1 - 0{,}0_4\,305\,t - 0{,}0_6\,305\,t^2)$; bei beiden Stoffen erfolgt die Drehung in der Richtung des Magnetisierungsstromes. Aus schwerem Jenaer Flintglas hat DU BOIS Platten verwandt, an deren hinteren Fläche das Licht durch eine Silberschicht gespiegelt wird. Für Feldstärken von 1000 Gauß eigneten sich Dicken von 1 mm[24]). Entgegen dem Verhalten natürlich drehender Stoffe wird die Drehung in magnetisch drehenden verdoppelt, wenn der Strahl durch Reflexion zurückgeworfen wird. Zur Vermeidung störender Reflexe werden schwach keilförmige Platten benutzt.

Sechsundzwanzigstes Kapitel.

Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe.

Da die Permeabilität μ im elektromagnetischen System dimensionslos ist, wird gewöhnlich die CGS-Einheit der magnetischen Induktion $\mathfrak{B} = \mu\,\mathfrak{H}$ als Gauß bezeichnet. Im praktischen System wäre sie durch $\mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{Volt} \cdot \mathrm{sec} \cdot 10^{-8}$ auszudrücken und für die Zahl der im Querschnitt vorhandenen magnetischen Induktionslinien, dem Integral der EMK, die Einheit $\mathrm{Volt} \cdot \mathrm{sec} \cdot 10^{-8}$ zu setzen.

[24]) H. DU BOIS u. A. P. WILLS, Verh D. Phys. Ges. 1, 168. 1899. — B. BECKMANN, Comm. Leiden, Suppl. Nr. 40. 1915.

[25]) P. PALLME KÖNIG, Ann. Phys. 25, 921. 1908.

Für die Magnetisierung $\mathfrak{J}$, dem magnetischen Momente der Volumen einheit und die Suszeptibilität $\varkappa$ gelten die Beziehungen:

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{B} - \mathfrak{H}}{4\pi} = \varkappa \mathfrak{H} = \frac{\mu - 1}{4\pi} \mathfrak{H}.$$

1. Magnetometrisches Verfahren.

Das Gaussche Verfahren zur Bestimmung der horizontalen Kom ponente des Erdfeldes liefert neben dieser zugleich das magnetisch Moment des Stabmagnets, und im Anschlu daran lassen sich die Momente anderer Stäb durch Ablenkungsversuche ermitteln, einerle ob es sich um permanenten oder induzierte Magnetismus handelt. Im letzten Falle be findet sich der ablenkende Stab in der Magne tisierungsspule, deren Wirkung auf das Magneto meter durch eine zweite aufgehoben wird, wel che gewöhnlich auf der entgegengesetzten Seit angebracht wird. Es ist besonders darauf z achten, daß diese Spulen, die hinreichend lan sein müssen, damit der Stab in einem gleichför migen Felde liegt, die Richtkraft des Magneto meters nicht ändern, was sich darin zeigt, da die Ausschläge nach den beiden Seiten ungleic werden.

Fig. 187. Astatisches Magnetometer.

Wird das Moment M gemessen und beträg das Volumen des Stabes v, so gilt für sein Magnetisierung $\mathfrak{J}$ die Beziehung $\mathfrak{J} = \frac{M}{v}$.

Astatisches Torsionsmagnetometer Beobachtungen mit dem Magnetometer sin an jenen Orten sehr erschwert oder unmöglich wo das Erdfeld den Störungen durch die vaga bundierenden Ströme der Straßenbahnen aus gesetzt ist. Abhilfe schafft man durch An wendung des astatischen Torsionsmagneto meters, bei welchem ein astatisches Paar glei cher Magnetnadeln angewendet wird, welche durch eine Stange fest verbunden, in dem große Abstande h übereinanderhängen (Fig. 187) Die Direktionskraft des Systems liefert die Torsion des Aufhängedraht

Der ablenkende Magnet, dessen Moment M zu messen ist, wirkt in der Höhe der einen Nadel vom Momente m, die sich in P_1 befindet (Fig. 188), und zwar befindet er sich in der ersten Hauptlage im Abstande a. Er erzeugt am Orte der Nadel ein ablenkendes Feld F, das durch den Ausschlag α gemessen wird. Bezeichnet D die Direktionskraft der Aufhängung, so ist unter Vernachlässigung der Wirkung auf die zweite Nadel: $D\,\alpha = F\,m \cos\alpha$ und für kleine Ablenkungen:

$$F = \frac{D\alpha}{m}\left(1 + \frac{1}{2}\alpha^2\right) = \frac{C\,x}{2\,A}\left(1 - \frac{5}{6}\left(\frac{x}{2\,A}\right)^2\right),$$

Fig. 188. Astatisches Magnetometer.

wenn m das Moment der Nadel, x den Ausschlag in Teilen der Skale und A ihren Abstand vom Spiegel bezeichnet.

Wir wollen nun die Wirkung auf beide Nadeln des astatischen Paares betrachten, von denen sich die eine im Punkte P_1, die andere im Abstande h senkrecht darüber in P_2 (Fig. 188) befindet. In P_1 erzeugt der Magnet das Feld $2\,M/a^3$ Um die Kraft in P_2 zu erhalten, zerlegen wir das Moment M in die beiden Komponenten $M \sin\mu$ und $M \cos\mu$ senkrecht und parallel zu dem Abstande $M P_2$. Die erste wirkt aus zweiter Hauptlage in P_2 und erzeugt das horizontale Feld $\frac{M}{(a^2+h^2)^{3/2}} \sin^2\varphi = \frac{M\,h^2}{(a^2+h^2)^{5/2}}$, die zweite wirkt aus erster Hauptlage und bringt das Feld

$$\frac{2\,M}{(a^2+h^2)^{3/2}} \cos^2\varphi = \frac{2\,M\,a^2}{(a^2+h^2)^{5/2}}$$

hervor. Dieses Feld dreht in entgegengesetzter Richtung wie das Hauptfeld, das vorhergehende in demselben Sinne, so daß die Summe aller drei Felder

$$F = M\left\{\frac{2}{a^3} + \frac{h^2 - 2\,a^2}{(a^2+h^2)^{5/2}}\right\} = \frac{2\,M}{a^3}\left\{1 + \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{a}{h}\right)^3 - \left(\frac{a}{h}\right)^5}{\left[1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2\right]^{5/2}}\right\}$$

$$\text{oder}\quad F = \frac{2\,M}{a^3}\left\{1 + \psi\left(\frac{a}{h}\right)\right\}.$$

Das Korrektionsglied $\psi\,(a/h)$ ist für kleine Werte von a positiv, hat für $a/h = 0{,}5$ ein Maximum ($= 0{,}0170$), wird mit wachsendem a kleiner, verschwindet für $a/h = \sqrt{0{,}5}$ und nimmt dann beschleunigt wachsende negative Werte an. Geht man also nicht über $a = 0{,}8\,h$ hinaus, so bleibt die Korrektur unterhalb 2%. Für $a = 1$ m braucht h

Diese Bedingung läßt sich ohne Schwierigkeit einhalten, indem man entweder das System an die Zimmerdecke hängt und die untere Nadel als Hauptmagnet benutzt oder umgekehrt den oberen, wobei das Instrument wie ein gewöhnliches Magnetometer tragbar eingerichtet und die untere Nadel dicht über dem Fußboden schwebt[1]). Die Empfindlichkeit wird in beiden Fällen durch Auswechselung des Aufhängedrahts geändert.

Durch Drehung des Torsionskreises kann das astatische System in die Nord-Süd- oder in die Ost-West-Richtung gebracht werden. In der ersten Lage haben kleine Änderungen in dem magnetischen Moment des Systems geringen Einfluß auf die Ruhelage, in der zweiten auf die Empfindlichkeit. Diese wird durch einen Magnetstab von bekanntem Moment M bestimmt nach der Gleichung $F = \frac{2\,M}{a^3}\left\{1 + \frac{\frac{1}{2}\,\mathfrak{L}^2 - \frac{3}{4}\,\mathfrak{l}^2}{a^2} + \psi\left(\frac{a}{h}\right)\right\}$, wenn $\mathfrak{L}$ und $\mathfrak{l}$ die Polabstände des ablenkenden und abgelenkten Magnets bezeichnen. Zu demselben Zweck läßt sich eine Stromspule verwenden, M ist dann gleich Stromstärke × Windungsfläche, $\mathfrak{L}$ die Spulenlänge in CGS-Einheiten.

Die Temperatur hat auf die Empfindlichkeit geringen Einfluß, etwa 0,5‰/Grad, der hauptsächlich von der Änderung des Nadelmoments herrührt. Da der Temperaturkoeffizient der Dauermagnete für ihre Verwendung von Bedeutung ist, sei noch kurz auf dessen Bestimmung hingewiesen, die mit Hilfe des Magnetometers vorgenommen wird. Man legt den Stab vom Momente M ziemlich nahe an das Instrument und hebt die erzeugte Ablenkung durch einen von der anderen Seite genäherten Magnet auf. Während dieser auf Zimmertemperatur bleibt, wird die Temperatur des ersten Stabes um t° geändert. Entspricht die dabei erfolgte Ablenkung dem Momente Δ, so ist der Temperaturkoeffizient $= \Delta/(M\,t)$[2]).

2. Entmagnetisierungsfaktor.

Das magnetisierende Feld $\mathfrak{H}$ eines Stabes, der sich in einer Magnetisierungsspule befindet, setzt sich zusammen aus der Feldstärke $\mathfrak{H}_0$ der Spule, die aus der Zahl der Windungen und der Länge folgt, und aus der Wirkung des freien Magnetismus, der besonders an den Stabenden angehäuft ist. Diese ist der Magnetisierung $\mathfrak{J}$ proportional und der Feldstärke $\mathfrak{H}_0$ entgegengerichtet; sie wird deshalb als entmagnetisierende Kraft $\mathfrak{H}_e$ bezeichnet, für welche gilt:

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}_0 - \mathfrak{H}_e = \mathfrak{H}_0 - s\,\mathfrak{J} = \mathfrak{H}_0 - s\,\frac{\mathfrak{B} - \mathfrak{H}}{4\pi} \quad \text{und} \quad \mathfrak{J} = \frac{\varkappa}{1 + s\,\varkappa}\,\mathfrak{H}_0\,.$$

---

[1]) F. Kohlrausch u. L. Holborn, Ann. Phys. 13, 1054. 1904; F. Henning, ebd. 15, 815. 1904; R. Dieterle, ZS. f. Instr. 1921, 80.

Selbst wenn die Größe ε, die Entmagnetisierungsfaktor heißt, ein kleiner Bruch ist, so wird die Magnetisierung $\mathfrak{J}$, da $\varkappa$ für Eisen groß ist, bedeutend geschwächt. Für einen Stab ist ε im allgemeinen keine Konstante, sondern nur für das Ellipsoid, das in einem gleichförmigen Felde magnetisiert wird Man benutzt deshalb bei Messungen mit dem Magnetometer das verlängerte Rotationsellipsoid als Normalform. Sind l und d die Achsen der Meridianellipse und e ihre Exzentrizität, so gilt

$$e = \sqrt{1 - \frac{d^2}{l^2}} \text{ und } \varepsilon = 4\pi \frac{1 - e^2}{e^2} \left(\frac{1}{2e} \ln \frac{1 + e}{1 - e} - 1 \right).$$

Für verschiedene Werte von l/d gibt die folgende Tabelle den Entmagnetisierungsfaktor ε.

Entmagnetisierungsfaktoren von Ellipsoiden.

l/d	ε	l/d	ε	l/d	ε
5	0,7015	30	0,0432	100	0,0054
10	0,2540	40	0,0266	150	0,0026
15	0,1350	50	0,0181	200	0,0016
20	0,0848	70	0,0101	300	0,0008
25	0,0587	90	0,0065	400	0,0004

Mit wachsender Abplattung nähert sich das Ellipsoid einer dünnen Scheibe, wofür $\varepsilon = 4\pi$ ist, und mit zunehmender Streckung dem unendlich langen Kreiszylinder, für den $\varepsilon = 0$. Für die Kugel ergibt sich $\varepsilon = \frac{4}{3}\pi = 4{,}19$. Diese Gestalt eignet sich mehr für die Prüfung der Theorie als für die Untersuchung der Stoffe auf ihre magnetischen Eigenschaften[3]).

Der Zylinder ist der am meisten benutzte Probestab, weil er am leichtesten herzustellen ist. Die Verteilung seiner Magnetisierung hängt von deren Stärke ab, worauf wir noch zurückkommen. Der Entmagnetisierungsfaktor wird empirisch bestimmt, indem man zuerst den Zylinder untersucht, ihn darauf zum Ellipsoid abdreht und nochmals beobachtet. Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse verschiedener Beobachter, welche teils das Magnetometer, teils die Induktionsspule (S. 296) benutzten. Das zweite Verfahren, welches du Bois[4]), Shuddemagen[5]) und Würschmidt[6]) anwandten, liefert kleinere Werte. Die beiden Reihen Shuddemagens unterscheiden sich dadurch, daß Reihe II mit Stäben von größerem Durchmesser gewonnen wurde. Beide Untersuchungsmethoden stimmen darin überein, daß die Entmagnetisierungsfaktoren nur unterhalb $\mathfrak{B} = 10\,000$ annähernd konstant sind, bei höheren Induktionen nehmen sie ab.

---

[3]) O. Grotrian, Wied. Ann. 57, 751 1896.

[4]) H. du Bois, Verh. D Phys. Ges. 1913. 305

[5]) C. Shuddemagen, Proc. Am. Acad. 43, 185. 1907.

[6]) J. [illegible]

Entmagnetisierungsfaktoren von Zylindern.

l/d	MANN	DU BOIS	SHUDDEMAGEN I	SHUDDEMAGEN II	WÜRSCHMIDT
20	0,0898	0,0775	0,0740	0,0672	0,0675
25	0,0628	0,0553	0,0515	0,0464	0,0476
30	0,0460	0,0393	0,0382	0,0344	0,0304
40	0,0274	0,0238	0,0234	0,0211	0,0223
50	0,0183	0,0162	0,0160	0,0144	0,0153

Die Beobachtung ergibt die Magnetisierung $\mathfrak{J}$ als Funktion der Feldstärke $\mathfrak{H}_0$ der Magnetisierungsspule. Um die Abhängigkeit von der wahren Feldstärke $\mathfrak{H}$ zu erhalten, trägt man die beobachteten Werte in einer Kurve O M′ auf (Fig. 189) und zieht eine Gerade O B durch den Koordinatenanfangspunkt, so daß tg A O B = ε ist. Die normale Magnetisierungskurve O M läßt sich dann in der Weise ableiten, daß die Abszisse jedes Punktes M′ der beobachteten Kurve um die Strecke A B, die Abszisse der Scherungslinie O B, verkürzt wird. Damit werden alle Abszissen der Kurve O M′ um εJ verkleinert (RAYLEIGH 1886).

Fig. 189. Scherung der Magnetisierungskurve.

Das Verfahren führt natürlich nur bei konstantem Entmagnetisierungsfaktor zum Ziele, also z. B. beim Ellipsoid. Für Zylinder, wo der Faktor bei hohen Induktionen nicht konstant ist, verläuft die Scherungslinie nicht geradlinig und ist durch besondere Beobachtungen zu bestimmen.

3. Induktionsspule.

Die Bestimmung der Magnetisierung mit der Induktionsspule beruht ebenso wie die der Feldstärke auf der Messung eines Zeitintegrals der EMK mit dem ballistischen Galvanometer. Wir wollen zunächst die Prüfung von Stäben betrachten.

a) Verteilung des Magnetismus in Stäben. Wird ein Dauermagnet vom Moment M aus großer Entfernung in die Mitte einer langen, engen Spule gebracht, welche n Windung/cm besitzt, so entsteht das Integral $4\pi n M$. An dem ballistischen Galvanometer vom Widerstand R möge aus dem ersten Ausschlage die Elektrizitätsmenge Q gemessen werden. Dann ist $M = \frac{Q R}{4 \pi n}$. Die Verteilung der Magnetisierung läßt

sich daraus erkennen, daß man eine kurze enge Spule längs des Stabes verschiebt. Bedeckt sie die Längeneinheit mit ihren Windungen, deren Zahl n′ sei, und beobachtet man bei dem Abziehen der Spule vom Stabe die Elektrizitätsmenge Q′ bei einem Widerstande R′, so ist das Moment M′ der betreffenden Längeneinheit $M' = \frac{Q'R'}{4\pi n'}$.

Ähnliche Betrachtungen lassen sich für induzierte Momente anstellen, wo die Versuchsanordnung insofern weniger einfach ist, als noch die Magnetisierungsspule hinzukommt und ihr Einfluß für sich bestimmt und abgezogen werden muß. Bringt man die kurze Induktionsspule K in der Mitte des Stabes E über oder unter einer dünnlagigen langen Induktionsspule L an und umgibt das Ganze mit der Magnetisierungs-

Fig. 190. Lange und kurze Induktionsspule.

Fig. 191. Magnetinduktor.

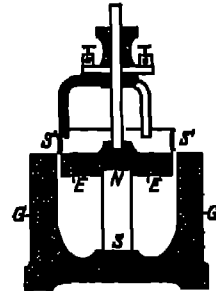



Fig. 192. Geschlossener Magnetinduktor.

spule M (Fig. 190), so läßt sich aus dem Quotienten M/M′ der Polabstand $\mathfrak{l}$ ermitteln [MASCART 1889[7])]. Für Ellipsoide ergibt sich bei längeren Formen der Wert gleich $^2/_3$ der Stablänge, wie es die Theorie verlangt; er ändert sich nicht mit der Magnetisierung, wie es bei Zylindern der Fall ist, wo $\mathfrak{l}$ umgekehrt wie $\varkappa$ erst bei steigender Magnetisierung abnimmt und dann wächst.

b) Erdmagnetischer Induktionskoeffizient. Ohne Magnetisierungsspule läßt sich in leicht ersichtlicher Weise das durch den Erdmagnetismus induzierte Moment von Dauermagneten bestimmen. Nachdem der Stab in die lange Spule eingeführt ist, wird diese in den magnetischen Meridian gestellt und der Induktionsstoß beim Drehen der Spule um 180° am Galvanometer beobachtet. Der Ausschlag entspricht dem doppelten Moment. Bei Verwendung einer Magnetisierungsspule läßt sich das Feld in jeder Lage durch das Schließen des Stromkreises in gewünschter Stärke herstellen. Das im Felde von 1 Gauß

induzierte Moment hängt von der Gestalt der Stäbe ab und beträg bei den länglichen Formen etwa 0,2 bis 0,3/Gramm

c) Magnetinduktor. Ein Dauermagnet von konstantem Momen kann bei solchen Arbeiten zur Kontrolle des ballistischen Galvanometer dienen, indem man den Ausschlag beobachtet, der bei der Einführun des Stabes in eine Induktionsspule erzeugt wird. Nach dem Vorgan von GAUSS und WEBER wird für einen solchen Magnetinduktor ei Doppelmagnet benutzt, dessen Teile mit gleichnamigen Polen aneinander stoßen (Fig. 191). Über dem Stab, der in einem Messingrohr liegt, wir eine kurze Spule zwischen Anschlägen verschoben, die an den Ende sitzen. Die Vorrichtung bedarf natürlich der Eichung mit einem Magne von bekanntem Moment oder mit einer Normalspule.

Haltbarer als ein solcher stabförmiger Doppelmagnet zeigt sich ei einfacher Magnet NS (Fig. 192), dessen Pole durch die Eisenscheiben E und die Glocke GG bis auf einen engen Spalt zu einem Ringe ge schlossen sind Die schmale Induktionsspule S'S' gleitet an einem Halte längs des Stabes durch den Spalt[8]).

4. Ring.

Wird die Magnetisierung mit der Induktionsspule bestimmt, so kan man sich von dem Einfluß frei machen, den die Pole des Probekörper auf das magnetisierende Feld ausüben, indem dieser die Form eine geschlossenen Ringes bekommt Ein Ring von gleichförmigem Quer schnitt F bildet die theoretisch einfachste Gestalt zur Untersuchun der magnetischen Eigenschaften, weil keine Pole auftreten und kein Wirkung in die Ferne ausgeübt wird Erhält er zwei Wicklungen, wovo die eine als Magnetisierungs-, die andere als Induktionsspule dient, s wird die Induktion $\mathfrak{B}$ beobachtet und die Feldstärke $\mathfrak{H}$ aus der Windung zahl berechnet. Besitzt die Induktionsspule die Windungszahl N, s entsteht beim Beginn oder Aufhören des Induktionsflusses $\mathfrak{B}F$ da Integral der EMK $\int E\,dt = QR = \mathfrak{B}FN = (4\pi\mathfrak{J} + \mathfrak{H})FN$, so da $\mathfrak{B} = \frac{QR}{FN}$ und $\mathfrak{J} = \frac{1}{4\pi F}\left(\frac{QR}{N} - \mathfrak{H}(F + F')\right)$, wo F' den nicht vo Eisen ausgefüllten Querschnitt der Magnetisierungsspule bedeutet, wen die Induktionsspule außen darüber gewickelt ist.

Die Induktion $\mathfrak{B}$ und die Feldstärke $\mathfrak{H}$ lassen sich in der Weise dar stellen, daß $\mathfrak{H}$ die Kraftlinien in einem Luftraum bedeutet, der konzen trisch mit dem Ring in dem Eisenkörper ausgespart ist, während $\mathfrak{B}$ durc die Linien ausgedrückt wird, die einen engen radialen Luftspalt durch setzen.

Wird der Ring aufgeschnitten, so tritt an der Schnittfläche eine Streuung der Kraftlinien auf, die mit der Breite des Luftspalts zunimmt. Die Magnetisierungskurve eines solchen aufgeschnittenen Ringes bedarf einer Scherung, um sie auf die Normalform zurückzuführen[9]).

5. Joch.

Die Herstellung eines Eisenringes und seine Bewicklung mit Magnetisierungs- und Induktionsspule ist so umständlich, daß Versuche mit dieser Gestalt immer nur auf grundlegende Messungen beschränkt geblieben sind. Zu den laufenden Prüfungen des Eisens werden gewöhnlich Stäbe verwandt, deren Enden durch ein Joch geschlossen werden, so daß auch hier der Einfluß der Pole wegfällt (J. HOPKINSON 1885). Fig. 103 zeigt eine gebräuchliche Anordnung. der Stab von 6 mm Durchmesser und 33 cm Länge befindet sich in einem schweren Rahmen aus magnetisch weichem Eisen, z. B. legiertem mit 4 bis 5% Silicium, in dem die Enden des guten Schlusses wegen durch eiserne Backen festgeklemmt werden, so daß sich fast die gesamten Induktionslinien, die durch die Induktionsspule S gemessen werden, zu Ringen schließen und nur wenige wegen der nicht gänzlich zu vermeidenden Fugen an den Verbindungsstellen in die Luft austreten. Sie werden ebenso wie beim freien Stab durch eine Scherung der Magnetisierungskurve berücksichtigt, die in der Weise am genauesten bestimmt wird, daß man den Stab, für den die Magnetisierungskurve im Joch aufgenommen worden ist, zum Ellipsoid abdreht und mit dem Magnetometer beobachtet.

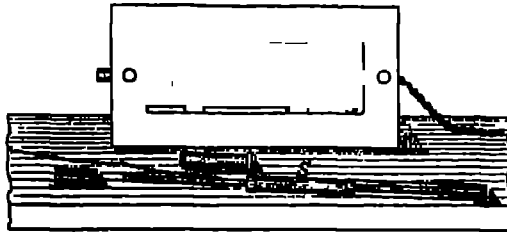



Fig. 103. Joch.

Mit dem Joch lassen sich nicht nur zylindrische Stäbe untersuchen, sondern auch Bleche, von denen passend geschnittene Streifen zu Bündeln vereinigt werden. Hierbei ist die Walzrichtung zu berücksichtigen, da das Blech meist in dieser magnetisch besser ist. Man setzt also das Bündel aus Streifen zusammen, die zur einen Hälfte in der Walzrichtung, zur anderen senkrecht dazu geschnitten sind.

Um die Scherung zu vermeiden, benutzt man nach EWING (1892) ein Doppeljoch. Es besteht aus zwei dicken Platten PP (Fig. 104), die zwei zylindrische Bohrungen aufweisen, in welche zwei gleiche Probestäbe eingeklemmt werden, und zwar befindet sich einmal die ganze Stablänge,

sodann die halbe zwischen den Backen des Joches Die Magnetisierungsspulen bestehen aus zwei gleichen Teilen, von denen sich im letzten Falle nur einer auf jedem Stabe befindet. Außerdem sitzen natürlich Sekundärspulen auf den Stäben.

Da der magnetische Widerstand der Stoßfuge und des Joches von der Stablänge unabhängig ist, so verdoppelt sich nicht der Widerstand des ganzen Kreises mit der Verdoppelung der Stablänge, und für einen gewissen Wert $\mathfrak{B}$ ergibt sich als zugehörige Feldstärke $\mathfrak{H}$ die Beziehung $\mathfrak{H} = \frac{0{,}4\pi N}{l}(2 I_2 - I_1)$, wenn N die Windungszahl eines Spulenteils, l die entsprechende Stablänge und I_1 und I_2 die Stromstärken in der ganzen und halben Magnetisierungsspule bedeuten.

Das Doppeljoch wurde mehrfach zur Konstruktion magnetischer Brücken benutzt, bei denen der Widerstand des Joches durch besondere

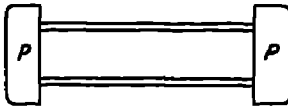



Fig. 194. Doppeljoch

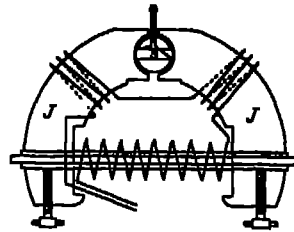



Fig. 195. KÖPSELsches Joch.

Windungen kompensiert wird[10]). Doch ist das Joch für sehr genaue Messungen nicht sehr geeignet; schon die Schwankung im Widerstande der Stoßfugen läßt sich schwer beseitigen, was natürlich die Brauchbarkeit der Anordnung für technische Messungen nicht hindert. Für diesen Zweck wird das Joch in mannigfachen Formen benutzt. So ist es bei dem Apparat von KÖPSEL [1894[11]]) durch eine Bohrung unterbrochen, in welcher sich eine Spule S analog wie im Drehspulengalvanometer bewegt; sie besitzt einen Kern aus weichem Eisen, so daß nur ein schmaler Luftspalt frei bleibt (Fig. 195). Die magnetisierende Wirkung des Stromes der Drehspule wird durch einige auf das Joch aufgebrachte Windungen kompensiert, die in den Kreis der auf dem Probestab sitzenden Magnetisierungsspule geschaltet werden und ihr entgegenwirken. Die Ablenkung der Drehspule wird an einem Zeiger abgelesen.

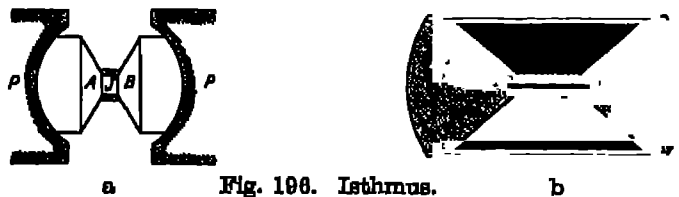
Für die Untersuchung schwacher Magnetisierungen, etwa unter 0,5 Gauß, kommt das Joch deshalb nicht in Frage, weil es sich nicht vollständig

---

[10]) CH. W. BURROWS, Bull. Bur. Stand. 6, 31. 1909. — ILLIOVICI, Bull. Soc. Intern. des Électriciens 1913, 581.

entmagnetisieren läßt. Hier kann man nur Stäbe anwenden, die mit dem Magnetometer oder dem ballistischen Galvanometer beobachtet werden. Das erstere Verfahren ist allein brauchbar, wenn man gleichzeitig die Viskosität untersuchen will, mit der schwache Magnetisierungen entstehen. Vor solchen Messungen der Anfangspermeabilität ist der Probestab sorgfältig zu entmagnetisieren, wozu er der Wirkung eines Wechselfeldes von abnehmender Stärke ausgesetzt wird, das in einer Spule entweder durch kommutierten Gleichstrom unter Einschaltung eines ständig wachsenden Widerstandes, z. B. eines Elektrolyts oder durch Induktion eines sich allmählich entfernenden Wechselstromfeldes erzeugt wird[12].

6. Isthmus.

In den Spulen untersucht man die Magnetisierung meistens nur bis zu Feldstärken von 500 Gauß, für stärkere Felder werden Elektromagnete benutzt, deren Kraftlinien durch kegelförmige Polstücke auf einen

a Fig. 196. Isthmus. b

kleinen Querschnitt zusammengedrängt werden (Ewing und Low 1889). Günstig für die Gleichmäßigkeit des konzentrierten Feldes ist ein Kegelwinkel von $2 \times 40°$, für die Erreichung einer großen Stärke ein solcher von $2 \times 55°$ (Stefan 1889).

Man kann entweder die kegelförmigen Polstücke A, B mit einem dazwischengeschalteten kurzen und dünnen Zylinder J aus einem Stück des Eisens herstellen, das untersucht werden soll (Fig. 196a), oder man bedient sich ständig derselben Polstücke aus weichem Eisen, zwischen die der kurze Probestab eingeklemmt wird (Fig. 196b). Dieser Isthmus wird möglichst eng mit der Induktionsspule umgeben. Eine zweite ähnliche konzentrische Spule hat einen etwas größeren Durchmesser. Sie dient in Gegenschaltung zu der inneren, mit welcher die Induktion gemessen wird, zur Bestimmung der Feldstärke. Werden stets dieselben Polstücke benutzt, so sind beide Spulen auf dünne Röhrchen gewickelt, die man auf das Stäbchen schiebt, das etwa 30 mm lang und 3 mm dick gewählt wird[13].

---

[12]) E. Gumlich u. W. Rogowski, Ann. Phys. 34, 235. 1911.

Mit einer solchen Anordnung läßt sich schon bei $\mathfrak{H} = 150$ der Anschluß an Messungen im Joch gewinnen, und nach oben nähert man sich mit einem ausreichenden Elektromagnet bald der Sättigung, die magnetisch weiche Eisensorten schon bei 2000 Gauß, harte kaum bei 5000 Gauß praktisch erreichen. Zur Erzielung der höchsten Feldstärken kann man den Isthmus noch verkürzen; die kurzen Spulen werden dann zweckmäßig mit einem eisernen Feldstärkemaß (S. 288) geeicht.

Die Kommutierung des Feldes empfiehlt sich natürlich wegen der großen Eisenmasse des Elektromagnets nicht. Die beiden Polschuhe mit dem Isthmus, die durch eine Messinghülse zu einem Stück verbunden sind, lassen sich mittels eines Handgriffs um 180° um eine Achse drehen, die sich in einem an dem Magnetgestell befestigten Lager bewegt.

Magnetische Eigenschaften einiger Stoffe.

	$4\pi\mathfrak{J}_\infty$	R	K	μ_{max}	μ_0
Elektrolyteisen, ausgeglüht 0,024 % C	21 600	11 000	0,4	14 000	—
Schwed. Holzkohleneisen „ 0,027 % C	21 200	10 000	0,8	0400	—
Eisen I, ausgeglüht 0,23 % C	20 900	10 600	2,3	2180	170
„ abgeschreckt, 0,23 % C	20 800	11 000	23,2	—	70
Eisen II, ausgeglüht 0,69 % C	20 200	11 100	6,3	880	126
„ abgeschreckt, 0,69 % C	19 500	10 000	47,4	—	54
Eisen III, ausgeglüht 0,99 % C	19 900	10 000	7,5	600	132
„ abgeschreckt, 0,99 % C	18 200	6 700	48,0	—	—
Eisen IV, ausgeglüht, 1,57 % C	19 300	10 300	10,2	530	143
„ abgeschreckt, 1,57 % C	16 700	6 700	61,6	—	—
Gußeisen ausgeglüht, 3,1 % C	16 700	5 300	4,6	—	020
Legiertes Eisen, ausgeglüht 3,7 % Si	19 500	6 800	0,07	4870	435
HEUSLERsche Legierung, 75,6 Cu, 14,3 Mn, 10,1 Al	2 800	480	3,75	80	—
Nickel	6 200	3 500	7,5	310	40
Kobalt	17 800	3 100	12	175	—
Eisenkobalt 34 % Co	23 700	8 200	2,7	1050	—
Eisenmangan, abgeschreckt, 12,3 % Mn	—	230	48,0	3,6	—
„ auf —78° abgekühlt 12,3 % Mn	—	1 430	60,7	15,2	—
Wolframstahl, abgeschreckt 5 % Wo	—	9 000	70	—	—
Kobaltstahl, abgeschreckt 30 % Co	—	8 000	220	—	—

Mit einer Anordnung, die eine Vereinigung von Isthmus und Joch darstellt, hat GUMLICH[14]) größere Eisenproben untersuchen können, was wegen deren meist unvollkommener Gleichmäßigkeit von Vorteil ist. Mit der Feldstärke kam er dabei bis etwa 8000 Gauß.

In der vorstehenden Tabelle sind die Sättigungswerte $4\pi\mathfrak{J}_\infty$ nebst einigen anderen magnetischen Eigenschaften verschiedener Stoffe,

meistens nach Beobachtungen der P.-T. Reichsanstalt aufgeführt R bezeichnet die Remanenz, K die Koerzitivkraft, μ_{max} und μ_0 die maximale und die Anfangspermeabilität[18]). Aus den Werten für die verschiedenen Eisenarten ist der Einfluß des Kohlenstoffgehalts zu ersehen. Das legierte Eisen wird besonders als Dynamoblech benutzt, seine Magnetisierung kommt bei mittleren Feldstärken derjenigen des Schmiedeeisens nahe, der elektrische Widerstand ist jedoch größer, so daß der Verlust durch Wirbelströme geringer ist. Auch tritt die Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften, welche viele Eisensorten bei andauerndem Gebrauch erleiden, bei dem legierten Eisen in schwächerem Grade auf, es altert wenig.

7. Magnetische Wage.

Schon früh hat man sich bemüht, die Stärke von Dauermagneten durch ihre Tragkraft zu messen. Genaue Ergebnisse lassen sich nur von geschlossenen magnetischen Kreisen erwarten, deren durch einen Schnitt getrennte Teile sich mit einer Kraft P anziehen, für welche $P = \frac{\mathfrak{B}^2}{8\pi}$ Auf dieses Gesetz hat DU BOIS[10]) eine magnetische Wage gegründet, deren Genauigkeit auch wissenschaftlichen Ansprüchen genügt.

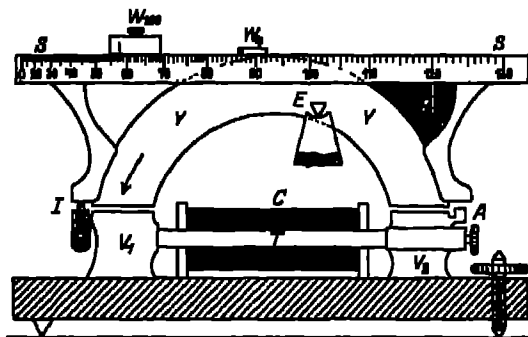



Fig. 197. Magnetische Wage.

Der Probestab T (Fig. 197) von 33 cm Länge und 0,798 cm Durchmesser, der die Magnetisierungsspule C trägt, ist beiderseits in zwei schwere Backen V_1V_2 eingeklemmt, über denen das als Wagebalken ausgebildete Schlußjoch YY auf einer exzentrischen Schneide E schwebt Das Gleichgewicht wird durch einen Bleiklotz P hergestellt. Wird das Feld erregt, so wirkt der magnetische Zug stärker auf den längeren Balken, das Gleichgewicht wird durch die Laufgewichte $W_{100}W_4$ bewirkt, die längs einer Skale SS gleiten, deren quadratische Teilung nach einem anderweitig untersuchten Probestabe aufgetragen ist.

Der Einfluß der Magnetisierungsspule auf das Joch wird durch einige entgegengesetzt wirkende Windungen kompensiert, die vertikale Kom-

---

[18]) Über die vollständigen Magnetisierungskurven s. E. GUMLICH, Leitfaden der magnetischen Messungen. Braunschweig 1918.

ponente des Erdfeldes durch zwei kleine Magnete. Die horizontale Komponente braucht nicht berücksichtigt zu werden, da der Apparat senkrecht zum magnetischen Meridian aufgestellt wird. Die Windungszahl der Spule ist so abgeglichen, daß die Feldstärke gleich 100 I (Ampere) ist. Anschläge am Wagebalken verhindern, daß er die Seitenbacken berührt, und werden so eingestellt, daß die Breite der Luftschlitze 0,25 mm beträgt. Das Laufgewicht wird so lange verschoben, bis das Joch eben vom Anschlag abgerissen wird, was eine sichere Einstellung ergibt.

8. Energieverlust.

Der Energieverlust, der infolge der Ummagnetisierung auftritt, läßt sich durch Ausmessung der Hystereseschleife bestimmen. Für das ungleichartige technische Eisen, wovon große Mengen untersucht werden müssen, um einen Durchschnittswert zu erhalten, ist es zweckmäßiger, den Verlust durch Wechselstrom zu messen. Hierzu wird ein magnetischer Kreis benutzt, der aus 10 kg Eisen besteht. Die zu untersuchenden Bleche werden in Streifen von 50 cm Länge und 3 cm Breite geschnitten, durch Papier isoliert und in der von EPSTEIN[17]) angegebenen Anordnung untersucht. Sie besteht

Fig 198. Anordnung zur Prüfung von Blechen.

Fig. 199. Magnetisierung durch Wechselstrom.

aus einem Quadrat von vier Blechbündeln B, die je von einer Magnetisierungs- und einer Sekundärspule S umgeben, an den Stoßfugen durch dünne Preßspanlagen zwar voneinander isoliert, aber durch Holzbacken zu einem guten magnetischen Schluß zusammengepreßt werden (Fig. 198).

In dem Stromkreise der Magnetisierungsspule M (Fig. 199), deren N Windungen von Wechselstrom mit sinusförmigem Verlauf gespeist

werden, befindet sich der Strommesser S und der Leistungsmesser N; seine Spannungsspule W und ebenso der Spannungsmesser V liegen an den Klemmen AB. Die Maschine wird nicht durch Widerstandsänderung, sondern durch die wechselnde Erregung der Feldmagnete geregelt.

Von den Angaben A' des Leistungsmessers sind abzuziehen der Energieverbrauch im Spannungsmesser, derjenige in der Spannungsspule W und die Stromwärme in der Magnetisierungsspule, so daß, wenn R_1, R_2 und R_3 die entsprechenden Widerstände sind, für die Ummagnetisierungsarbeit A gilt: $A = A' - \frac{E^2}{R_1} - \frac{E^2}{R_2} - I^2 R_3$, wo E die Ablesung am Spannungsmesser und I diejenige am Strommesser bedeutet. Vernachlässigen wir den OHMschen Widerstand der Magnetisierungsspule, so ist $\mathfrak{B} = \frac{10^8 E}{4 \nu N F f}$, wenn die effektive Spannung E in Volt ausgedrückt wird, F den Querschnitt des Eisens, ν die Frequenz und f den Formfaktor des Stromes (für Sinusstrom ist $f = 1{,}11$) bedeutet. Denn für eine Viertelperiode ist $\int_0^{\pi/4} E\,dt = \mathfrak{B} F N$, so daß man für die mittlere Spannung erhält: $E_m = \frac{E}{f} = \frac{4}{T}\int_0^{\pi/4} E\,dt = 4 \nu \mathfrak{B} F N$.

Nun bewirkt nicht allein die Hysterese einen Energieverlust, sondern auch das Auftreten von Wirbelströmen. Der erste ist proportional der Frequenz, der zweite ihrem Quadrat. Man trennt beide dadurch, daß der Gesamtverlust für mehrere Frequenzen gemessen wird, Dabei ist auf die Temperatur des Eisens zu achten; sie pflegt meistens anzusteigen, wodurch das Leitvermögen abnimmt und damit auch der Verlust durch Wirbelströme. Man reduziert die Messungen, die meistens für $\mathfrak{B} = 10\,000$ und 15 000 angestellt werden, auf 20° und gibt die Verlustziffer in Watt/kg Eisen an. Ihre relative Änderung nach einer 600 Stunden langen Erwärmung auf 100° heißt Alterungskoeffizient.

Andere Eisenprüfapparate haben RICHTER (1902) sowie MÖLLINGER (1901) angegeben, während GUMLICH und ROSE sie mit der EPSTEINschen Anordnung verglichen[18]). Diese wird auch zur Messung der Induktion und deren Abhängigkeit von der Feldstärke benutzt, wofür ebenfalls die Verwendung umfangreicher Proben von Vorteil ist[19]). Zur einwandfreien Messung der Feldstärke bedienten sich GUMLICH und ROGOWSKI[20]) platter Spulen, die in der Mitte auf die Eisenbündel auf-

---

[18]) E. GUMLICH u. P. ROSE, ETZ 1905, 403.

[19]) J. EPSTEIN, ETZ 1911, 343 u. 1314; 1912, 1180.

gelegt werden. Da hier keine Streuung stattfindet, so geht die Tangentialkomponente der Feldstärke stetig aus dem Eisen in die Luft über, so daß die in der Luft bestimmte Feldstärke mit der im Eisen übereinstimmt. Die Induktion wird mit einer um das Eisen gewickelten Sekundärspule ermittelt.

9. Magnetischer Spannungsmesser.

Die magnetomotorische Kraft oder die magnetische Spannung zwischen zwei Punkten A und B eines Feldes ist gleich dem Linienintegral $\int_A^B \mathfrak{H}\, dl$, das sich längs einer Verbindungslinie AB erstreckt. Im allgemeinen gelangt man auf zwei Wegen nur dann zu demselben Ergebnis, wenn die von ihnen eingeschlossene Fläche von keiner elektrischen Strömung geschnitten wird.

Zur Messung der elektrischen Spannung wird nach ROGOWSKI und STEINHAUS (1912) eine flache Spule benutzt, die auf einen biegsamen Träger, z. B. Preßspan, gewickelt ist. Die Spulenenden, die durch Holzleisten geschützt sind, legt man an die zu messenden Punkte A und B, die Drahtenden sind in der Mitte herausgeführt und werden mit einem ballistischen Galvanometer verbunden, dessen Ausschlag α dem beim Kommutieren des Feldes erzeugten EMK-Integral oder dem Linienintegral proportional ist, also $\alpha = C\int_A^B \mathfrak{H}\, dl$.

Legt man den Spannungsmesser geschlossen um ein Bündel von N Drähten, die vom Strome I durchflossen werden, und beobachtet man beim Kommutieren dieses Stromes den Ausschlag α_0, so ist $\alpha_0 = 4\, C\, \pi\, N\, I$ und $C = \frac{\alpha_0}{4\pi N I}$, so daß $\int_A^B \mathfrak{H}\, dl = \frac{4\pi N I \alpha}{\alpha_0}$. Wechselfelder werden mit dem Vibrationsgalvanometer in der Kompensationsschaltung gemessen[31]).

10. Thermische Behandlung.

Da die magnetischen Eigenschaften in hohem Grade von der Vorbehandlung der Stoffe abhängen, so müssen diese meist vor ihrer Untersuchung erst in den gewünschten Zustand gebracht werden. Ist nicht gerade der Einfluß mechanischer oder thermischer Härtung der Gegenstand der Versuche, so pflegt man von dem ausgeglühten Zustande auszugehen, der am zweckmäßigsten durch die Erhitzung in elektrisch geheiztem Röhrenofen im Vakuum oder in einem indifferenten Gase erreicht

[31]) W. ROGOWSKI, Arch. f. Elekt. 1, 511. 1912; ENGELHARDT, ZS. f. Instr.

wird[38]). Erfahrungsgemäß verbessert das Ausglühen nur anfangs die magnetischen Eigenschaften, wahrscheinlich nur so lange, als dadurch eine Entgasung der Stoffe bewirkt wird, während länger fortgesetztes Erhitzen eine Verschlechterung herbeiführt. Als schädlich erweist sich namentlich ein Gehalt an Wasserstoff und Sauerstoff. Das letztere Gas verbindet sich in der Rotglut mit dem meistens vorhandenen Kohlenstoff, an dem der Stoff dann gleichzeitig ärmer wird Elektrolytisches Eisen, das nach der Herstellung viel Wasserstoff enthält, wird durch Ausglühen im Vakuum sehr verbessert

Das Glühen der Magnetstähle vor dem Abschrecken wird in ähnlichen Öfen vorgenommen, aus denen sie unmittelbar unter eine Wasserbrause oder in ein Ölbad gebracht werden. Mit dem Thermoelement wird die Härtungstemperatur gemessen und die für den einzelnen Stahl günstigste ausgesucht

Mäßige Temperaturänderungen haben einen geringen Einfluß auf die Permeabilität. Ebensowenig auf den Sättigungswert, der auch bei der tiefsten Temperatur nur eine schwache Zunahme erfährt, dagegen in höheren Temperaturen in wachsendem Maße abnimmt. Starke Änderungen der Magnetisierung treten bei den Umwandlungspunkten auf, die außerdem eine Unstetigkeit in der Ausdehnung, dem elektrischen Widerstand, der Thermokraft usw. aufweisen. Ferner zeigt sich auch eine Bindung oder Entwicklung von Wärme, die freilich nicht so groß wie die Schmelzwärme ist und deshalb zu ihrem Nachweis ein besonderes Verfahren erfordert. Der Temperaturverlauf wird mit dem Thermoelement AB in dem zu prüfenden Eisenstück E (Fig 200) verfolgt, welches unter Zwischenlegung eines Glimmerblatts an einen unmagnetischen Körper K, wie Kupfer, Nickelstahl oder dgl., mit Asbestfäden gebunden ist. Gleichzeitig beobachtet man mit dem Differenzelement A-B-A den Temperaturunterschied zwischen beiden Körpern, in dessen Verlauf sich die Umwandlungspunkte bei der Erwärmung und Abkühlung des Ofens abheben, wenn diese stetig geleitet werden.

Fig. 200. Bestimmung von Umwandlungspunkten.

Die Magnetisierbarkeit hört auf: für Eisen bei etwa 800°, für Kobalt bei 1150° und für Nickel bei 360°. Manganstahl (12% Mn) und Nickelstahl (25% Ni) sind nach der Erhitzung auf 660° fast unmagnetisch, erlangen aber nach der Abkühlung auf tiefe Temperatur die Magnetisierbarkeit wieder.

Siebenundzwanzigstes Kapitel.

Schwach magnetische Stoffe.

Bei den schwach magnetischen Stoffen werden unterschieden: magnetische und diamagnetische, je nachdem die Suszeptibilität $\varkappa$ p oder negativ ist. Die ersten bewegen sich im ungleichförmigen nach der Stelle größter Kraft, die zweiten nach Stellen kleinster I Bei der geringen Größe von $\varkappa$ ist die Form des Probekörpers ohne fluß auf seine Magnetisierung. Außer der Größe $\varkappa$, die sich auf die Vol einheit bezieht, wird noch die spezifische Suszeptibilität χ definier welche $\chi = \varkappa/s$, wenn s die Dichte des Körpers bezeichnet. Fern $\overline{\chi} = \varkappa M/s$, die Molekular- oder Atom-Suszeptibilität, je nachdem I Molekular- oder Atomgewicht bedeutet.

Zu beachten ist, daß stets der Unterschied in der Magnetisierb der Körper gegen die ihrer Umgebung gemessen wird, so daß $\varkappa$ für die Wirkung in Frage kommt; für Wasser ist $\varkappa \cdot 10^6 = -0{,}7$ für Luft $= +0{,}030$, bezogen auf 18° und das Vakuum.
Der Diamagnetismus ist meistens von der Temperatur unabh für den Paramagnetismus gilt vielfach das Curiesche Gesetz, w $\chi\,T = \text{const}$.

Von Metallen sind stark paramagnetisch: Mn, Ce, Er, U, P stark diamagnetisch erweist sich nur Bi, viel schwächer sch dann folgende Sb. Flüssigkeiten sind mit Ausnahme der Verbindunge Fe, Ni, Co, Mn und Cr und flüssigem O_2 meist diamagnetisch. Bei ist $\varkappa$ proportional dem Druck. Eine Veränderlichkeit von $\varkappa$ mit der stärke ist nur für große Werte von $\varkappa$ sicher nachgewiesen. Eine Untersuchung verlangt natürlich vollständig eisenfreie Probek Remanenz ist nicht vorhanden.

Befindet sich ein kleiner Körper vom Volumen v und der Mass einem ungleichmäßigen Felde von der Stärke $\mathfrak{H}$, so wirkt auf ihn ir beliebigen Richtung x die Kraft

$$P = \frac{\varkappa}{2}\int \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}\,d\,v = \varkappa\,v\,\mathfrak{H}\,\frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial x} = \chi\,m\,\mathfrak{H}\,\frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial x}.$$

Der Körper hängt an dem einen Arm einer Drehwage, ein (gewicht an dem anderen Arm. Das Feld wird von den schneidenför Polstücken eines Elektromagnets gebildet, zu deren Ebene sich der I senkrecht bewegt. Damit diese Bewegung im ungleichmäßigen vor sich geht, befindet sich der Körper entweder außerhalb der Schn

eine Nullmethode angewandt und die Kraft durch Drehung des Torsionskopfes gemessen[1]).

Für die Messung mit der gewöhnlichen Wage (J. PLÜCKER 1854) gibt man dem Probekörper zylinderförmige Gestalt vom Querschnitt F und hängt ihn vertikal an einem Arm so zwischen die Pole des Feldmagnets, daß sich das eine Ende nur noch in einem schwachen Felde $\mathfrak{H}_0$ befindet. Wird der Elektromagnet erregt, so verschiebt sich der Zylinder vertikal und wird durch das Gegengewicht m in die Stellung zurückgebracht. Besitzt das umgebende Mittel die Suszeptibilität $\varkappa_0$, so ist $\varkappa - \varkappa_0 = \frac{2\,m g}{F(\mathfrak{H}^2 - \mathfrak{H}_0^2)}$. H_0^2 ist meist zu vernachlässigen. Statt des Zylinders aus festem Stoff kann man auch eine Flüssigkeitssäule, die in ein Rohr eingefüllt ist, so behandeln[2]).

Für Flüssigkeiten ist am gebräuchlichsten die oben (S. 290) beschriebene Steighöhenmethode (G. QUINCKE 1885): der enge Schenkel, der sich im Felde befindet, besitzt eine Weite von etwa 2 mm, der andere eine solche von 25—30 mm, so daß das Sinken des Flüssigkeitsspiegels an dieser Stelle zu vernachlässigen ist. Wird die Kuppe im engen Schenkel um die Höhe h gehoben, so ist $\varkappa - \varkappa_0 = \frac{2\,h s g}{\mathfrak{H}^2}$. Ungleichmäßigkeiten des Feldes lassen sich durch Nullmethoden unschädlich machen. Zu dem Zweck verdünnten LIEBKNECHT und WILLS[3]) paramagnetische Lösungen so lange, bis sie unmagnetisch wurden, der Paramagnetismus des gelösten Körpers also durch den Diamagnetismus des Lösungsmittels kompensiert wurde, deren Additivität allerdings zu prüfen ist

Die Flüssigkeitskuppe haben JÄGER und MEYER[4]) an derselben Stelle gehalten, indem sie den Gasdruck auf einer der beiden Seiten änderten und den Druckunterschied mit einem Manometer bestimmten.

Auf gute Benetzung der Rohre ist zu achten. Wenn sie nachläßt, wie es bei Messung von Mangansalzen oft eintritt, ist gründliche Reinigung mit konzentrierter Schwefelsäure unter Zusatz von Kaliumbichromat notwendig.

Da das Verfahren eine genaue Bestimmung der Suszeptibilität von Flüssigkeiten liefert, so läßt sich auch eine indirekte Messung fester Körper durch eine Vergleichung mit einer bekannten Flüssigkeit ausführen[5]). Für Gase ergibt sich $\varkappa$, wenn man sie über der Flüssigkeit wechselt[6]).

---

[1]) G. MESLIN, Ann. chim. phys. 7, 145. 1906; P. TÄNZLER, Ann. Phys. 24, 931. 1907; C. CHÉNEVEAU, Phil. Mag. 20, 327. 1910.

[2]) P. PASCAL, C. R. 150, 1054. 1910.

[3]) O. LIEBKNECHT u. A. P. WILLS, Ann. Phys. 1, 178. 1900.

[4]) G. JÄGER u. ST. MEYER, Wien. Ber. (2) 106, 595. 1897.

[5]) J. KÖNIGSBERGER, Wied. Ann. 66, 698. 1898.

Weil der Paramagnetismus von Körpern, die dem CURIEschen Gesetz folgen, mit der Abnahme der Temperatur zunimmt, so verspricht besonders die Untersuchung bei tiefen Temperaturen Aufschluß über viele Erscheinungen. Solche Messungen hat KAMERLINGH ONNES[7]) mit seinen Mitarbeitern bis zur Temperatur des flüssigen Heliums durchgeführt. Bei — 271° erhielt er z. B. mit 0,345 g Gadoliniumsulfat, einem Stoffe, der dem CURIEschen Gesetz bis zu den tiefsten Temperaturen folgt, in einem Felde von 15 000 Gauß eine Zugkraft von über 100 g. Die Magnetisierungskurve zeigte mit abnehmender Temperatur unterhalb — 260° eine wachsende Krümmung, die darauf deutet, daß die Suszeptibilität mit zunehmender Feldstärke abnimmt[8]).

---

[7]) H. KAMERLINGH ONNES u. A. PERRIER, Comm. Leiden Nr. 116, 1910; Nr. 122 und 124a. 1911; Nr. 139a, c und d. 1914. — E. OOSTERHUIS, ebd. Nr. 129b. 1912; Nr. 139b. 1914.

[8]) H. KAMERLINGH ONNES, ebd. Nr. 140d. 1914.

V. Licht.

Achtundzwanzigstes Kapitel.

Lichtmaße.

Das deutsche Lichtmaß, die Hefnerlampe, besteht aus einem Behälter für das Amylazetat, auf dessen Deckel das neusilberne Dochtrohr von 0,15 mm Wandstärke, 8 mm innerem Durchmesser und 35 mm Länge sitzt. Die vorgeschriebene Flammenhöhe von 40 mm wird entweder mit einem Visier V oder einem optischen Flammenmesser O eingestellt, die mittels eines Ringes auf dem Deckel festgeklemmt werden. Zur Prüfung der Abmessungen wird der Lampe eine Lehre L beigegeben. Der Deckel D schützt das Dochtrohr nach dem Gebrauch (Fig. 201).

Fig. 201. Hefnerlampe.

Auf die Lichtstärke der Lampe, die mindestens 10 Minuten vor Beginn der Messungen anzuzünden ist, hat die Flammenhöhe besonderen Einfluß: einer Änderung der Höhe um 1 mm entspricht eine Änderung der Lichtstärke von etwa 3%. Ebenso ist die Wandstärke des Dochtrohrs genau einzuhalten, da eine Verstärkung wegen der damit vermehrten Wärmeleitung die Lichtstärke herabsetzt. Ferner ist auf den Druck, die Feuchtigkeit und den Kohlensäuregehalt der umgebenden Luft zu achten. Nimmt man nach der Vorschrift der P.-T. Reichsanstalt den normalen Wert der Lichteinheit bei einem Druck p von 760 mm Quecksilber, einer Feuchtigkeit f von 8,8 l/cbm und einem Kohlensäuregehalt k von 0,75 l/cbm an, so ergibt sich für die Lichtstärke der Normallampe:

$$LW = 1 + 0{,}000\,15\,(p - 760) - 0{,}0055\,(f - 8{,}8) - 0{,}0072\,(k - 0{,}75)$$

Bei guter Luftung des Beobachtungsraumes schwankt der Kohlensäuregehalt nur um etwa 0,3 l, was die Lichtstärke um nicht mehr als 0,2% ändert. Die Feuchtigkeit wechselt etwa zwischen 3 und 18 in unseren Breiten mit der Jahreszeit, was 8,5% in der Lichtstärke ausmacht: im Durchschnitt hat die Lampe im Frühjahr und im Herbst den normalen Wert, im Sommer einen kleineren und im Winter einen größeren. Zwischen der Spannung e des Wasserdampfes in der Atmosphäre, die mit dem Psychrometer beobachtet wird (S. 178) und der Größe f besteht die Beziehung: $f = 1000\, e/(p - e)$[1]).

Versuche zur Verwirklichung der VIOLLEschen Einheit haben außer ihrem Autor (1881 und 1884) LUMMER (1891 und 1894) und PETAVEL (1899) angestellt. Ein Erfolg ist hier ebenso ausgeblieben wie bei der SIEMENSschen Einheit, die durch die Lichtstärke eines elektrisch geglühten Platinbleches kurz vor dessen Durchschmelzen dargestellt werden sollte. LUMMER und KURLBAUM[2]) schlugen ebenfalls die Strahlung eines glühenden Platinbleches als Einheit vor; seine Temperatur sollte aber dadurch bestimmt werden, daß eine Wasserschicht von 2 cm Dicke, die von zwei 1 mm dicken Quarzplatten begrenzt wurde, 10% der Gesamtstrahlung hindurchläßt. Wie die Versuche ergaben, war bei Verwendung von reinem Platin eine Genauigkeit von 1% erreichbar.

Um von der Oberflächenbeschaffenheit der Strahler unabhängig zu werden, empfiehlt sich die Anwendung des schwarzen Körpers. Hier würde es sich nur um die Auswahl und Messung einer bestimmten Temperatur T_0 handeln, bei welcher die sichtbare Hohlraumstrahlung einer passenden Fläche zu photometrieren wäre. Nach WARBURG (1917) wäre T_0 relativ zu messen, und zwar sollten für die Normaltemperatur T_0 und eine angenommene Hilfstemperatur T_1 einerseits die Intensitäten einer bestimmten Teilstrahlung und daraus der Unterschied $1/T_0 - 1/T_1$, andererseits die Gesamtstrahlungen und daraus das Verhältnis T_1/T_0 bestimmt werden, so daß sich T_0 und T_1 berechnen ließen. T_0 wäre so zu wählen, daß die Flächenhelle des schwarzen Körpers der gebräuchlichen der Glühlampen gleichkäme.

Näher liegt es, mit Rücksicht auf die VIOLLEsche Einheit die Temperatur T_0 durch den Schmelzpunkt des Platins festzulegen. U. a. hat IVES[3] Versuche in dieser Richtung angestellt und die Flächenhelle des schwarzen Körpers bei der Temperatur des schmelzenden Platins zu 55,40 intern. Kerzen = 61,5 HK/cm² gefunden. Der schwarze Körper bestand aus

[1]) E. LIEBENTHAL, ZS. f. Instr. 1895, 157, 1923, 209; und Praktische Photometrie, 1907.

[2]) O. LUMMER u. F. KURLBAUM, Berl. Ber. 1894, 229.

einem zylindrischen Platinrohr von 5 cm freier Länge und 1,25 cm Durchmesser, das zwischen Klemmen eingespannt und durch den elektrischen Strom durchgeschmolzen wurde. Das Rohr von 0,2 mm Wandstärke besaß einen Schlitz, der auf einer Länge von 2,5 cm auf 1 mm erweitert war. Aus dieser Öffnung fiel schräg die vielfach an der Innenfläche reflektierte Strahlung auf das Photometer.

Ferner haben BRODHUN und HOFFMANN[4]) Helligkeiten des schwarzen Körpers gemessen. Für die Temperatur des schmelzenden Platins wurde ein elektrisch geheiztes Iridiumrohr benutzt und im Mittel eine Helle von 65,24 HK/cm² gemessen, während sich für den Palladiumschmelzpunkt, der mit drei verschiedenen schwarzen Körpern beobachtet wurde, der Wert von 15,66 HK/cm² ergab. Um die Streuung der Ergebnisse zu vermeiden, welche bei dem Gebrauch des gewöhnlichen schwarzen Körpers auftraten, wurde in einem größeren Hohlraum konzentrisch ein kleinerer angeordnet, dessen Helligkeit bei sehr langsam steigender Temperatur verfolgt wurde. Die Farbtemperatur der Hefnerlampe beträgt etwa 1600°, liegt also zwischen den beiden Schmelzpunkten.

Bei der Vergleichung von Lichtquellen werden vielfach Gebrauchsnormale und Zwischenglieder benutzt, von denen eine bestimmte Konstanz vorausgesetzt werden muß, wenn man sie auch häufiger mit den Einheitslampen kontrolliert. Brauchbar sind für diesen Zweck besonders elektrische Glühlampen, die vorher bei der normalen Spannung lange gebrannt und gealtert sind. Bei der Prüfung werden sie mit geringerer Helligkeit, und zwar ständig mit derselben Stromstärke, gebrannt. Nicht alle Lampen sind brauchbar; man pflegt die besten aus einem größeren Vorrat auszuwählen. Oft zeigen Glühlampen, wie sich bei den Pyrometerlampen störend bemerkbar gemacht hat, im Laufe der Zeit selbst bei dem Brennen mit unternormaler Spannung und nach langer Alterung kleine Schwankungen der Helligkeit, deren Ursache bisher noch nicht genügend geklärt ist.

Neunundzwanzigstes Kapitel.

Grundlagen der Photometrie.

Größere Helligkeitsunterschiede vermag das menschliche Auge schwer dem Betrage nach abzuschätzen. Dagegen wird die Helligkeit zweier aneinander stoßender diffuser Flächen derselben Farbe genau auf Gleichheit beurteilt; bei mittleren Helligkeiten werden Unterschiede

von etwa 1% noch wahrgenommen, wobei die Bewegung des anvisierten Gegenstandes, z. B. seine Betrachtung in einem langsam bewegten Spiegel, von Vorteil ist.

Mit etwa der doppelten Genauigkeit nimmt das Auge wahr, ob sich zwei Flächenstücke, die passend in einer größeren, anders beleuchteten Fläche liegen, aus ihrer Umgebung gleich stark herausheben und ihr gegenüber den gleichen Kontrast zeigen. Am schärfsten wird die Beobachtung, wenn die Stärke des Kontrastes etwa $3\frac{1}{2}$% beträgt.

Die Photometer beruhen darauf, daß das Auge nach dem Gleichheits- oder Kontrastprinzip die Helligkeiten der von zwei verschiedenen Lichtquellen beleuchteten Flächen beurteilt, wenn diese in meßbarer Weise geändert werden. Das einfachste Mittel besteht darin, die Entfernung zwischen Lichtquelle und beleuchteter Fläche zu variieren, bis die Helle beider Flächen gleich ist. Geht der Abstand der Lichtquelle von der Fläche bei Einhaltung desselben Einfallswinkels von a_1 in a_2 über, so verhalten sich die Flächenhellen wie $1/a_1^2 : 1/a_2^2$.

Zur Ausführung dieses Verfahrens dient die Photometerbank, auf der die zu vergleichenden Lichtquellen und der von ihnen zu beleuchtende Schirm des Photometers auf fahrbaren Schlitten zu verschieben sind. Bei ausgedehnten Lichtquellen sind die Abstände so groß zu wählen, daß das Entfernungsgesetz gilt, was im einzelnen Falle zu prüfen ist.

Um die Unsymmetrie des Photometerschirmes zu eliminieren, vertauscht man die beiden Seiten, indem das Photometer um eine zur Bank senkrechte Achse umgelegt wird. Beobachtet man alsdann die Entfernungen a_1' und a_2', so erhält man als Ergebnis $1/(a_1 a_1') : 1/(a_2 a_2')$. Ferner lassen sich die beiden Lichtquellen statt untereinander je mit einer dritten vergleichen, die man unverrückt an derselben Stelle beläßt.

Statt der Entfernungsänderung kann man die eine Lichtquelle in dem erforderlichen Maße schwächen, wozu verschiedene Mittel dienen. Zur Schwächung einer ebenen, gleichmäßig diffus leuchtenden Fläche A von der Helle e kann eine Blende B mit der verstellbaren Öffnung F dienen (Fig. 202). Ist a der Abstand der Blende B von dem Photometerschirm S, so wird dort die Beleuchtung E erzeugt, die ausgedrückt wird durch $E = \frac{eF}{a^2} \cos i$, wenn i den Einfallswinkel der Strahlen auf S bezeichnet.

Wird die Fläche A durch eine Linse L, die hinter der Blende B steht, scharf auf S abgebildet, so ist $E = \frac{DeF}{a^2}$, wenn D die Durchlässigkeit der Linse bezeichnet. Die Öffnungen der Blenden sind entweder durch

Ferner kommen zur Schwächung Rauchgläser in Betracht, denen man zum Variieren ihrer Dicke die Form zweier übereinander verschiebbarer Keile geben kann. Die Auswahl ist so zu treffen, daß man Platten mit großer Selektion vermeidet. Handelt es sich um keine sehr große Schwächung, so ist jedenfalls der rotierende Sektor vorzuziehen, der das Licht nicht verändert. Seine Wirkung beruht auf dem TALBOTschen Gesetz (1834), wonach ein periodisch auftretender Lichtreiz, wenn die Periode kurz genug ist, eine stetige Empfindung hervorruft, welche derjenigen gleich ist, welche entstände, wenn das während einer Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Periode verteilt würde.

In den Strahlengang wird eine Kreisscheibe mit verstellbaren offenen Sektoren gebracht, die durch einen Elektromotor in schnelle Umdrehungen versetzt wird. Beträgt die Größe der Öffnungen in Grade α, so wird das Licht im Verhältnis $\alpha/360$ geschwächt. Man benutzt entweder Scheiben mit unveränderlichen Öffnungen, die man wahlweise auf der Achse des

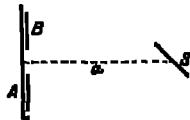



Fig. 202. Blende.

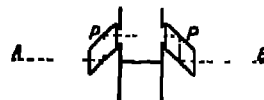



Fig. 203. Rotierender Lichtstrahl.

Motors befestigt, oder solche Sektoren, deren Größe während der Rotation verstellt und abgelesen werden kann. Diese Konstruktionen lassen sich vereinfachen, wenn man nicht den Sektor, sondern das Strahlenbündel rotieren läßt. Es wird durch ein Paar FRESNELsche Prismen PP (Fig. 203) auf einer Strecke in eine parallele Richtung abgelenkt und durchsetzt hier zwei gleiche, einander gegenüberliegende verstellbare Ausschnitte einer feststehenden Scheibe. Da sich die Prismen um die Achse AB des Strahles drehen, wird das Licht entsprechend der Öffnung des Sektors geschwächt[1]).

Bei der Schwächung durch Polarisation, werden gewöhnlich die beiden zu vergleichenden Lichtströme Φ_1 und Φ_2, die aus natürlichem Licht bestehen, in zwei zueinander senkrecht polarisierte verwandelt, mit denen man die beiden Hälften eines Gesichtsfeldes beleuchtet, welches durch ein drehbares NICOLsches Prisma betrachtet wird. Sind φ und $90° - \varphi$ die Winkel, welche die Schwingungsrichtung des Nicols mit derjenigen der beiden Feldhälften bei gleicher Helligkeit bildet, so ist $\Phi_1 : \Phi_2 = C \operatorname{tg}^2 \varphi$.

Zur Eliminierung von C werden die beiden Lichtströme vertauscht; erhält man dann $\Phi_1 . \Phi_2 = C \operatorname{tg}^2 \varphi_1$ und $\Phi_2 : \Phi_1 = C \operatorname{tg}^2 \varphi_2$, so ist

$$\Phi_1 : \Phi_2 = \operatorname{tg} \varphi_1 : \operatorname{tg} \varphi_2 .$$

Oder man nimmt einen dritten Lichtstrom Φ_3 zur Hilfe; beobachtet man dann $\Phi_1 : \Phi_3 = C \operatorname{tg}^2 \varphi'$ und $\Phi_2 : \Phi_3 = C \operatorname{tg} \varphi''$, so folgt

$$\Phi_1 : \Phi_2 = \operatorname{tg}^2 \varphi' . \operatorname{tg}^2 \varphi''.$$

Die Meßgenauigkeit ist am größten für $\varphi = 45°$, wo einer Änderung von φ um 0,1° eine solche von Φ um 0,7% entspricht, da für konstantes Φ_3 gilt: $\frac{d\Phi}{\Phi} = \frac{4\, d\varphi}{\sin 2\varphi}$.

Das Verfahren, das wegen des starken Lichtverlustes oft mit geringen Helligkeiten arbeiten muß, setzt voraus, daß die ursprünglichen Lichtströme nicht schon zum Teil polarisiert sind. In solchem Falle muß man sie depolarisieren, indem man sie durch eine mattgeschliffene Milchglasplatte hindurchgehen oder auf eine Gipsplatte fallen läßt.

Dreißigstes Kapitel.

Lichtstärke.

1. Vergleichsfelder ortsfester Photometer.

Die verschiedenen Photometer unterscheiden sich durch ihre Schirme und die Anordnung der Vergleichsfelder. Aus dem Apparat von RITCHIE (1826) ging eine Form hervor, bei der ein Keil aus weißem Karton oder aus Gips G (Fig. 204), dessen Winkel etwa 90° betrug, auf seinen beiden Seiten von den zu vergleichenden Lichtquellen L_1 L_2 beleuchtet wird.

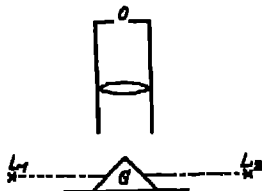
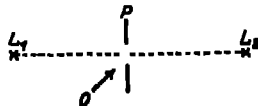



Fig. 204. RITCHIEscher Keil. Fig. 205. Fettfleckphotometer.

Sind diese so justiert, daß auf jede Keilfläche dieselbe Beleuchtungsstärke fällt, so erscheint der Keil dem Auge O des Beobachters, der mit einer Lupe senkrecht auf die Kante sieht, als gleichmäßig beleuchtete Fläche.

Das BUNSENsche Photometer besitzt einen Schirm P (Fig. 205) aus durchscheinendem Papier, der in der Mitte einen Fettfleck aufweist, welcher mehr Licht durchläßt und weniger reflektiert als die Umgebung. Stellt man unter Benutzung eines dritten Vergleichslichts so ein, daß der Fleck einmal auf der einen, dann auf der anderen Seite verschwindet,

und für II a_2 und a_2', so ergibt sich für das Verhältnis der Lichtstärken $\frac{I_1}{I_2} = \frac{a_1 a_1'}{a_2 a_2'}$. Der Winkel, unter welchem der Schirm betrachtet wird, beeinflußt die Einstellung und ist deshalb konstant zu halten[1]).

Das BUNSENsche Photometer hat den Nachteil, daß jedes Vergleichsfeld von beiden Lichtquellen beleuchtet wird. Dieser Übelstand ist bei dem Würfel von LUMMER und BRODHUN (1889) vermieden. Er besteht aus zwei rechtwinkligen Prismen, deren ebene Hypotenusenflächen aneinander gepreßt sind. Auf der Fläche des linken Prismas sind einige Stellen (Fig. 206a) durch Ätzen oder durch Sandstrahlgebläse vertieft, so daß hier dünne Luftschichten entstehen. Sieht man mit einer Lupe durch die Fläche J in den Würfel, so erblickt man mit Hilfe der beiden Spiegel Sp und Sp′ die zwei Seiten des Gipsschirmes S, die von den beiden zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet werden, und zwar die linke Seite direkt in der Mitte der Hypotenusenfläche, die rechte total reflektiert an dem Rande (Fig. 206b). Man stellt die Lichtquellen so ein, daß die Grenze zwischen Mitte und Rand des Gesichtsfeldes verschwindet. Schirm, Spiegel und Würfel sind in einem geschwärzten Messinggehäuse angeordnet, das um eine Achse um 180° zu drehen ist.

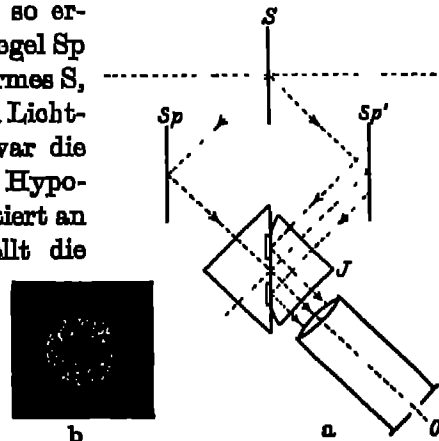



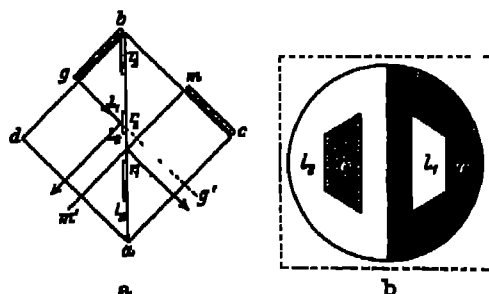
Fig. 206. LUMMER-BRODHUNscher Würfel

Für Kontrastbeobachtungen haben LUMMER und BRODHUN (1892) eine andere Würfelform angegeben. An den Stellen r_1 und r_2 der linken Hypotenusenfläche ist eine dünne Glasschicht weggenommen, während die Kathetenflächen b d und b c fast bis zur Hälfte mit den Glasplatten bg und cm bedeckt sind, die das durchgehende Licht um 8% schwächen (Fig. 207a). An den Stellen r_1 und r_2 wird das auf b c fallende Licht total nach a c reflektiert, während die auf b d fallenden Strahlen an den Stellen l_1 und l_2 den Würfel durchsetzen. Stellt man auf Gleichheit der Felder r_2 und l_2 ein, so heben sich dagegen die Felder r_1 und l_1 gleich stark ab, da beide in gleichem Grade durch die Glasplatten geschwächt werden. Fig. 207b zeigt die Ansicht des Gesichtsfeldes.

[1]) H. KRÜSS, Zentralbl. f. Elt. 6, 781. 1884. — W. WEBER, Wied. Ann. 31,

Statt des Würfels bedient sich MARTENS[1]) bei seinem Photometer das Fig. 208 schematisch darstellt, eines Zwillingsprismas Z (FREY und KRIES 1881). Ohne ein solches würden die durch die Prismen a und b von den beiden Schirmflächen S eintretenden Strahlen zu je einem Bilde hinter der Blende B vereinigt. Durch das Zwillingsprisma entstehen vier Bilder; davon werden a_2 und b_1 abgeblendet, von den übrig bleibenden geht das eine von L_1, das andere von L_2 aus, und das Auge des Beobachters, der scharf auf die Kante, die Grenze der Felder, einstellt, sieht das ganze Gesichtsfeld beleuchtet. Werden beide Schirmseiten auf gleiche Helligkeit gebracht, so verschwindet die Trennungslinie der Felder, wenn die Öffnungen für die Prismen a und b ohne Steg ineinander übergehen.

Nach demselben Prinzip hat MARTENS auch ein Photometer für Kontrast angegeben.

Das Interferenzphotometer (FUCHS 1880) beruht auf der Vergleichung zweier Fransensysteme gleicher Neigung, die an einer planparallelen Luftplatte

a b
Fig. 207. Kontrastwürfel.

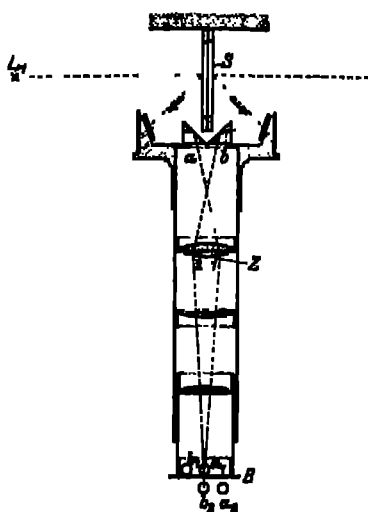



Fig. 208.
MARTENSsches Photometer.

im durchgehenden und reflektierten Licht an der Grenze der Totalreflexion entstehen. Der Beobachter blickt durch einen Würfel der aus zwei durch eine dünne Luftschicht getrennte, rechtwinklige Prismen gebildet wird. Die beiden Systeme bestehen aus komplementär gefärbten Streifen und verschwinden, wenn die interferierenden Lichtquellen einander gleich sind. Zur Vergleichung ihrer Lichtstärken beleuchtet man Mattscheiben, die vor die Würfelseiten gestellt werden[2]). Bisher ist dieses Photometer nur selten angewendet worden.

---

[1]) F. F. MARTENS, Verh. D. Phys. Ges. 1899, 278.

2. Tragbare Photometer.

Die beschriebenen Einrichtungen finden zumeist in Verbindung mit iner Bank in ortsfesten Aufstellungen Verwendung Das Bedürfnis, ie Beleuchtung von beliebigen Räumen und von Straßen zu messen, at zur Konstruktion tragbarer Instrumente Anlaß gegeben, von denen inige Beispiele angeführt werden mögen.

Fig. 209. WEBERsches Photometer.

Das Milchglasphotometer von L. WEBER 1883) besteht aus einem an einem Halter orizontal befestigten Rohr A, um dessen ıchse das zweite Rohr B drehbar ist. Das rste enthält eine kleine Benzinlampe L als 'ergleichslichtquelle, welche die Milchglaslatte M_1 beleuchtet, die mit einem Trieb ings einer Teilung verschoben werden kann.)ie Flamme von L wird auf konstanter Höhe on 20 mm gehalten, was sich durch ein Glimmerfenster an einer Teilung rüfen läßt. Das Rohr B, das einen LUMMER-BRODHUNschen Würfel W nthält und durch eine Milchglasplatte M_2 abgeschlossen ist, wird auf

Fig. 210. BRODHUNsches Photometer.

lie zu messende Lichtquelle eingestellt und die Gleichheit der Photoneterfelder durch Verschieben der Milchglasplatte M_1 bewirkt. Außerlem wird zur Abgleichung die Milchglasplatte M_2 ausgewechselt oder in Rauchglas vorgesteckt. Bezeichnet a den Abstand zwischen der Milchglasplatte M_1 und der Benzinlampe L bei Gleichheit der Photoneterfelder, so ist die Lichtstärke J der zu messenden Lampe, deren Abstand a_1 betragen möge, gegeben durch $J = C\,a_1^2/a^2$.

BRODHUN benutzt zur Schwächung der elektrischen Vergleichslampe, velche die Milchglasplatte M_1 beleuchtet, den feststehenden Sektor nit rotierenden Prismen $P_1\,P_2$ (Fig. 210). Die Strahlen werden beider-

Lupe L in der Blende B' wieder vereinigt. Das um die Achse von A dreh bare Rohr B enthält außer dem Gipsschirm G das Reflexionsprisma R[4]

MARTENS versieht sein beschriebenes Photometer (S. 318), das für de Vergleichsfeld ein Biprisma aufweist, mit einer Polarisationseinrichtung womit die Vergleichslichtquelle geschwächt werden kann Hier gilt fi die Lichtstärke J der zu messenden Lichtquelle $J = C a_1^2 \operatorname{tg} \varphi$, wen $\varphi = 0$ der Nicolstellung entspricht, bei der die Vergleichslampe au gelöscht ist.

Die Konstante C der Instrumente wird dadurch bestimmt, daß ein Lichtquelle von bekannter Stärke im gemessenen Abstande a_2 photo metriert wird.

Bei dem Photometer von GEHLHOFF und SCHERING[5]) wird von Fläche oder Schirmen, auf denen das zu messende Licht diffus verbreitet wird

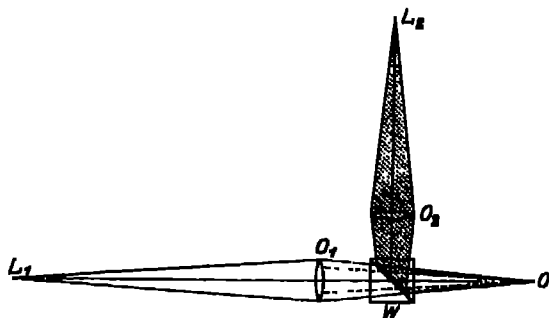



Fig. 211. GEHLHOFF-SCHERINGsches Photometer.

kein Gebrauch gemacht, obwohl ausgedehnte Lichtquellen nicht ve langt werden. Diese können auch punktförmig oder von geringer Helli keit sein.

Eine Sammellinse, durch welche eine Lichtquelle in die Augenpupil abgebildet wird, erscheint dem Auge gleichmäßig beleuchtet; die Helli keit hängt von der Brennweite ab, solange das Bild kleiner als d Pupille ist. Die zu vergleichenden Lichtquellen werden durch zw Sammellinsen abgebildet, und zwar unter Einschaltung eines Phot meterwürfels, so daß im Auge des Beobachters zwei konzentrisol Bilder entstehen, deren Helligkeit durch Veränderung der Vergleich lampe abgeglichen wird.

Die schematische Fig. 211 zeigt den Strahlengang: L_1 und L_2 sind d beiden Lichtquellen, O_1 und O_2 die beiden Linsen, O das Auge, W d

[4]) E. BRODHUN, ZS. f. Instr. 1907, 8 Einige Abänderungen der beiden Instr mente s. bei W. BECHSTEIN, ebd. 1907, 178.

Würfel, der in bezug auf die Strahlenbündel wie eine Blende wirkt; er befindet sich in der deutlichen Sehweite.

Die Vergleichslichtquelle befindet sich in dem Nebenrohr des Instruments und wird von einer durch eine Glühlampe beleuchteten Mattscheibe gebildet, deren Licht durch zwei Nicol polarisiert und meßbar geschwächt werden kann. Die in der Entfernung a befindliche Lichtquelle L_1 von der Stärke J_1 erzeugt in der vorderen Brennebene der Linse O_1 eine Beleuchtung $J_1/(a - f)^2$ und in der Ebene der Netzhaut eine solche von $J_1 f^2/[(a - f)^2 \varphi^2]$, wenn f die Brennweite der Linse und φ die des Auges bezeichnet. Werden zwei Lichtstärken J_1 und J_1' hintereinander gemessen und jedesmal die Stärke J_2 von L_2 durch Drehen des einen Nicols um die Winkel α und α' abgeglichen, so ist

$$\frac{J_1}{(a_1-f)^2} \cos^2 \alpha' = \frac{J_1'}{(a_1'-f)^2} \cos^2 \alpha$$

Das Instrument wird geeicht durch Messung einer bekannten Lichtstärke in bekannter Entfernung. Die untere Grenze des Meßbereichs ist durch den Reizschwellenwert der Netzhaut gegeben, der für die Netzhautgrube bei Sehwinkeln von mehr als 1° zu etwa $1 \cdot 10^{-5}$ Lx gefunden wurde. Danach ergab sich als untere Grenze $10^{-5} : f^2/\varphi^2 = 10^{-7}$, wenn für das Instrument $f^2/\varphi^2 = 100$, f = 20 cm war. Die Grenze läßt sich durch Vergrößerung der Brennweite f herabsetzen.

Einunddreißigstes Kapitel.

Beleuchtung und Flächenhelle.

Zur Messung einer Beleuchtung entfernt man aus dem tragbaren Photometer den Auffangeschirm für die Messung der Lichtstärke und beleuchtet das betreffende Feld durch einen mattweißen Schirm, der an die Stelle der zu messenden Fläche gebracht und dadurch geeicht wird, daß auf ihm im Dunkelzimmer eine bekannte Beleuchtung erzeugt wird. Als solcher Schirm, den man zweckmäßig mit dem Photometer fest verbindet, dient im reflektierten Licht eine Scheibe aus mattem Papier oder Gips, im durchgelassenen eine mattgeschliffene Milchglasplatte. Beleuchtet man den Schirm in der Entfernung a senkrecht mit J HK, so ist $E = J/a^2$.

Zur Messung der Flächenhelle e bringt man dicht an der leuchtenden Fläche eine Blende von der Öffnung F an und mißt deren Lichtstärke J, wobei die Entfernung des Photometerschirmes von der Blende zu rechnen ist. Alsdann ist e = J/F HK/cm². Kleine leuchtende Flächen können durch eine Linse von kurzer Brennweite auf den Photometerschirm

vergrößert abgebildet werden; die Blende befindet sich dann dicht an der Linse auf der dem Photometer zugewandten Seite und muß ebenso wie vorher von Licht ganz ausgefüllt sein.

Wird eine matte, weiße Fläche von dem diffusen Reflexionsvermögen (Albedo) $\mathfrak{R}$ senkrecht aus der Entfernung a m mit einer Lichtquelle von J HK beleuchtet, so erhält man die Flächenhelle $10^{-4} \cdot J\mathfrak{R}/(\pi a^2)$ HK/cm². Als reflektierende Fläche kann man z. B. einen Schirm benutzen, auf dem Magnesia durch Verbrennen von Magnesium niedergeschlagen ist; dafür ist $\mathfrak{R} = 0{,}95$ [gemessen im Rot[1])].

Zweiunddreißigstes Kapitel.

Lichtverteilung.

Bei der Messung gleichartiger Lampen begnügt man sich oft damit sie nur in wenigen Richtungen zu messen. So kennzeichnet man eine elektrische Glühlampe wohl durch die mittlere Lichtstärke in einer zur Lampenachse senkrechten, durch die Mitte des Leuchtkörpers gelegten Ebene, die als mittlere horizontale Lichtstärke bezeichnet wird, wenn die Lampenachse senkrecht steht. Man mißt sie, indem entweder die Lampe rotiert oder das Licht durch rotierende Spiegel gesammelt und dem Photometerschirm zugeführt wird. Kommt es darauf an, die Lichtverteilung einer Lampe eingehender zu messen, so ist jedoch eine Photometrierung in verschiedenen Richtungen nicht zu umgehen.

Zur Darstellung der Verteilung denken wir uns um den Mittelpunk der Lampe, deren Achse LA senkrecht stehe, die Einheitskugel beschrieben ϑ sei der Winkel, den eine beliebige Ausstrahlungsrichtung LB mit de Achse bilde und φ derjenige, den die Meridianebene ALB mit derjenigen einschließt, die als Anfang der Zählung gewählt wird. Da meist Symmetrie in bezug auf die Achse herrscht, so werden nur Mittelwerte fü die einzelnen Poldistanzen ϑ angegeben, die man durch Rotation de Lampe bestimmen kann. Von 10 zu 10° aufgetragen, geben solch Messungen ein Bild der Verteilung. Der gesamte Lichtstrom Φ berechne sich hieraus nach $\Phi = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} J \sin\vartheta \, d\vartheta \, d\varphi = 2\pi \int_0^\pi J_\vartheta \sin\vartheta \, d\vartheta$, wenn J di Lichtstärke in der Richtung ϑ, φ und J_ϑ den Mittelwert für die Po distanz ϑ bezeichnet.

Die Herstellung von Lampenarten, deren Lichtstärke ein Maximu in ihrer Achse besitzt, hat dazu geführt, die Lichtquellen durch di mittlere räumliche Lichtstärke $I_\bigcirc = \Phi/4\pi$ zu kennzeichnen. Zu ihre

[1] [illegible]

Bestimmung ist die Lichtverteilung der Lampe aufzunehmen und daraus Φ sowie $J_{\bigcirc}$ zu berechnen. Ferner verwendet man noch die obere hemisphärische und die untere hemisphärische Lichtstärke, $J_{\frown}$ und $J_{\smile}$, die sich auf den oberen und unteren räumlichen Winkel 2π beziehen; diese sind durch eine horizontale Ebene getrennt, welche die Lampenmitte schneidet, so daß $J_{\frown} = \frac{\Phi_0}{2\pi}$, $J_{\smile} = \frac{\Phi_u}{2\pi}$ und $J_{\bigcirc} = \frac{1}{2} J(_{\frown} + J_{\smile})$.

Zur unmittelbaren Messung der mittleren räumlichen Lichtstärke dient die ULBRICHTsche Kugel (1900)[1]. Im Inneren einer Hohlkugel, deren Wand einen matten weißen Anstrich von diffusem Reflexionsvermögen besitzt, befindet sich die zu messende Lampe L und bringt an allen Stellen infolge der vielfachen Reflexion dieselbe Beleuchtung

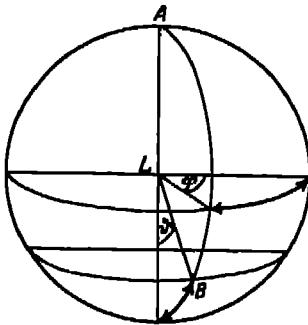



Fig. 212. Einheitskugel.

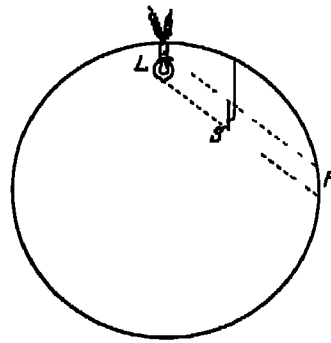



Fig. 213. Kugelphotometer.

hervor (Fig. 213). Diese wird an einem kleinen Fenster F gemessen, wo sie nach außen tritt. Vor direkter Bestrahlung ist das Fenster durch den Schirm S, eine weiße Kartonscheibe, deren Durchmesser nicht mehr als $^1/_{10}$ von dem der Kugel betragen darf, geschützt. Man eicht mit einer Lampe von bekannter räumlicher Lichtstärke.

Die Kugel wird aus verzinktem Eisenblech hergestellt und innen mit einem Grundanstrich aus Bleiweiß-Kopallack und einem dreifachen Deckanstrich aus Zinkweiß-Leimfarbe versehen. Für die Messung von mittleren Glühlampen genügt ein Durchmesser von 0,5 bis 1 m, für Bogenlampen wählt man mindestens 1,5 m.

Zur Vergleichung ähnlicher Bogenlampen wird statt der Kugel wohl ein Würfel von 2 m Kantenlänge benutzt, der einfacher herzustellen ist und einen bequemen Einbau der zu messenden Lampen erlaubt[2].

---

[1]) R. ULBRICHT, Das Kugelphotometer 1920.

[2]) H. BUCKLEY, Nat. Phys. Lab. Collect. Researches 18, 439. 1924.

Dreiunddreißigstes Kapitel.

Verschiedenfarbige Lichtquellen.

Die beschriebenen photometrischen Verfahren sind ohne weiteres a. wendbar auf die Vergleichung von Lichtquellen gleicher Farbe. Sch(bei geringen Farbunterschieden wird der ungeübte Beobachter u. sicher, geübtere pflegen dann darauf einzustellen, daß die Trennung linie bei Gleichheit der Photometerfelder undeutlich erscheint. Au(läßt sich die Vergleichung durch Einschieben einer bläulich gefärbt(Glasplatte zwischen Photometer und Normallampe erleichtern, wei es sich um die Messung hellerer Lampen handelt. Die Beobachtung vc schiedenfarbiger Lichtquellen braucht alsdann nur vorgenommen : werden, wenn die Lichtstärke des Systems von Normallampe und Plat geprüft werden muß, was seltener nötig ist

Mit der Zunahme des Farbunterschieds wachsen die Schwierigkeite Außerdem hängt alsdann die Einstellung von der Helligkeit ab (PURKINJ sches Phänomen). Man hat zwar die Gleichheit zwei Flächenhelligkeiten danach zu bemessen gesucht, d(Sehzeichen auf ihnen gleich deutlich erkennb sind. Doch ist diese Beurteilung nach der Sehschä wenig genau, und so ist man bei der Photometrieru verschieden gefärbter Lichtquellen auf das Flimm(photometer (O N. ROOD 1893) angewiesen.

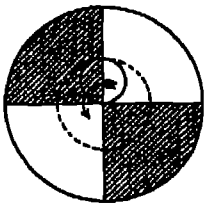



Fig. 214 Feld eines Flimmerphotometers.

Werden die beiden Felder eines Photometerschir in langsamem Wechsel mit zwei Lichtquellen v(ungleicher Stärke, aber gleicher Farbe beleuchtet, so hat das beobac tende Auge die unangenehmeEmpfindung des Flimmerns. Diese erhä sich auch, wenn die Lichtquellen verschiedene Farbe besitzen. Sie ka zum Verschwinden gebracht werden, wenn man die Wechselzahl gen erhöht: man beobachtet alsdann eine Mischfarbe. Aber auch bei kleine Wechselzahl hört das Flimmern schon bei passender Abgleichung d Lichtstärke auf. Man sieht die Lichtstärken dann als gleich an, we. das Flimmern bei der geringsten Wechselzahl verschwindet. Die Em findlichkeit der Einstellung hängt von der Wechselzahl ab; sie gering bei großer Steigerung der Geschwindigkeit, ihr Optimum wäcl jedoch mit dem Farbunterschied der zu vergleichenden Felder.

Diese erscheinen dem Auge des Beobachters abwechselnd, indem : z. B. durch ein von einem Motor oder Uhrwerk gedrehtes Prisma oc eine Keillinse in das Gesichtsfeld gelenkt werden[1]). Als Photomet(

---

[1]) W. BECHSTEIN, ZS. f. Instr. 1906, 249. Eine andere Anordnung bei H. BEND

schirm dient dabei z. B. der Ritchiesche Keil aus Karton oder Gips. Auch wird der Lummer-Brodhunsche Würfel benutzt. Werden von dessen einer Hälfte zwei Quadranten entfernt, so erhält man ein Feld, wie es Fig. 214 zeigt. Ein besonderes Okularrohr enthält ein kleines Prisma, das von einem Elektromotor mit verstellbarer Geschwindigkeit gedreht wird, und eine Blende von etwa 2° Öffnung, vom Okular aus gesehen, so daß das mit etwa 25 Lux beleuchtete Feld auf den kleinen Kreis der Figur beschränkt wird, welcher rotierend zu denken ist. Die Umgebung dieses Feldes wird hell gehalten, indem die weiße Vorderfläche einer Blende im Okularrohr durch ein angebrachtes Lämpchen gleichmäßig beleuchtet wird[1]).

Die Vergleichung des Flimmerphotometers mit dem Gleichheitsverfahren ist in der Weise ausgeführt worden, daß schrittweise vorgegangen und zwischen die zu vergleichenden Farben eine Reihe von Zwischenstufen eingeschaltet wurde (Kaskadenmethode), deren Farben sich allmählich einander näherten. Bei jeder Messung nach dem Gleichheitsverfahren waren alsdann Felder zu vergleichen, deren Färbung nur wenig verschieden war. Systematische Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden photometrischen Verfahren scheinen sich nicht ergeben zu haben.

Vierunddreißigstes Kapitel.

Spektralphotometer.

Spektralphotometer sind mit Vorrichtungen zur Zerlegung des Lichtes verbunden und dienen zur Vergleichung der Helligkeit enger Spektralbezirke. Zu diesem Zweck ersetzte Vierordt (1870) den Spalt durch einen Doppelspalt, dessen beide Hälften übereinanderliegen. Jede empfängt Licht von einer der beiden zu vergleichenden Quellen, so daß im Fernrohr zwei Spektren übereinander erscheinen, deren Helligkeiten durch Änderung der Spaltbreiten abgeglichen werden. Die Flächenhellen der Spalte verhalten sich alsdann für die eingestellte Wellenlänge umgekehrt wie die Spaltbreiten. Diese müssen bilateral verstellbar sein, d. h. beide Spalthälften bewegen sich symmetrisch zur Mitte, so daß sich die Wellenlänge nicht ändert. Der Beobachter sieht durch einen engen verstellbaren Okularspalt, durch welchen das Gesichtsfeld in einfarbigem Licht erscheint (Maxwell 1860).

Lummer und Brodhun (1892) schieben zwischen Spaltrohr und Prisma einen Würfel ein (Fig. 215a); für die Lichtquellen sind getrennte Spalt-

[1]) H. E. Ives und E. J. Brady, Phys.-Rev. 4, 222, 1914. — E. C. Crittenden

rohre vorgesehen, die auf einander senkrecht stehen und verschieden Würfelseiten beleuchten. Abgeglichen wird mit Veränderung der Spalt breite oder durch den rotierenden Sektor. Scharfe Grenzlinien, die zur Verschwinden zu bringen sind, müssen senkrecht zur brechenden Kant des Prismas verlaufen. Die Hypotenusenfläche des Würfels wird deshal in horizontale Streifen geteilt, die das Licht abwechselnd spiegeln un durchlassen (Fig. 215b).

Brace (1899) ersetzte Prisma und Würfel durch ein gleichseitige Flintglasprisma, das in der Mitte auseinandergeschnitten ist. Nachdem

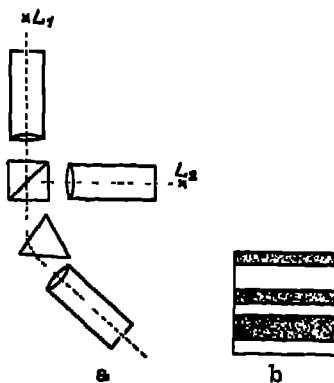



Fig. 215. Lummer-Brodhunsche Spektralphotometer.

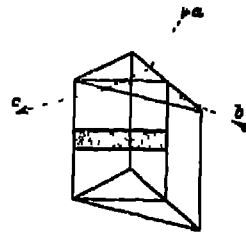



Fig. 216 Bracesches Prisma.

die eine Hälfte auf einem schmalen Streifen versilbert worden ist, wir sie mit der anderen wieder vereinigt. Fig. 215 zeigt den Strahlengang die Bündel a und b kommen aus verschiedenen Spaltrohren, das ein geht durch das Prisma durch, das andere wird an dem Silberstreife reflektiert; beide treten vereinigt (c) in das Okularrohr, durch dessen Spa das Auge die Prismenfläche gleichmäßig in der eingestellten Farl leuchten sieht.

Von dem Königschen Spektralphotometer, das hier noch zu erwähne ist, wurde schon die Martenssche Abänderung oben (S. 121) beschrieben worauf hier verwiesen wird.

Fünfunddreißigstes Kapitel.

Energiemessung.

Die Lichtempfindung wird durch die Strahlung des engen Spektra bereichs zwischen 0,75 und 0,4 μ Wellenlänge hervorgerufen. Man kan

zurückführen, muß dabei aber berücksichtigen, daß das Auge für die verschiedenen Farben ungleich empfindlich ist. Die Empfindlichkeitskurve $\varphi(\lambda)$ ist von zahlreichen Beobachtern aufgenommen, welche meistens das Flimmerphotometer benutzten. In der folgenden Tabelle sind die Werte angegeben, zu denen GIBSON und TYNDALL[1]) unter Mitwirkung von 52 Beobachtern bei schrittweisem Vorgehen nach dem Gleichheitsverfahren gelangten, indem sie gleichzeitig auch die Ergebnisse zahlreicher Vorgänger berücksichtigten. Das Maximum bei 0,555 μ ist als Einheit angenommen, von da fällt die Kurve, welche sich auf das normale menschliche Auge bezieht, nach beiden Seiten ab. Ein Unterschied zwischen den Beobachtungen mit dem Flimmer- und dem schrittweisen Gleichheitsverfahren ließ sich nicht mit Sicherheit feststellen.

Empfindlichkeit des Auges

λ	$\varphi(\lambda)$	λ	$\varphi(\lambda)$	λ	$\varphi(\lambda)$	λ	$\varphi(\lambda)$
0,40 μ	0,0004	0,50 μ	0,323	0,60 μ	0,631	0,70 μ	0,0041
0,41	0,0012	0,51	0,503	0,61	0,503	0,71	0,0021
0,42	0,0040	0,52	0,710	0,62	0,381	0,72	0,00105
0,43	0,0116	0,53	0,862	0,63	0,265	0,73	0,00052
0,44	0,023	0,54	0,954	0,64	0,175	0,74	0,00025
0,45	0,038	0,55	0,995	0,65	0,107	0,75	0,00012
0,46	0,060	0,56	0,995	0,66	0,061	0,76	0,00006
0,47	0,091	0,57	0,952	0,67	0,032		
0,48	0,139	0,58	0,870	0,68	0,017		
0,49	0,208	0,59	0,757	0,69	0,0082		

Für $\varphi(\lambda)$ hat GOLDHAMMER (1905) die Formel $\varphi(\lambda) = \left(\frac{0,555}{\lambda}\, e^{1-\frac{0,555}{\lambda}}\right)^{170,5}$ aufgestellt, die später vielfach vervollständigt worden ist[2]).

Abgesehen von den Farbenblinden zeigen auch sonst viele Personen Abweichungen ihrer Augenempfindlichkeit von dem durchschnittlichen Verlauf. Von 125 Beobachtern, die COBLENTZ und EMERSON untersuchten, wies ungefähr der vierte Teil die normale Empfindlichkeit auf, die anderen zeigten mehr oder weniger große Unterschiede, die sich auf die verschiedenen Gebiete des Spektrums verteilten, so daß sich Gruppen mit größerer Empfindlichkeit in Rot, Blau usw. bilden lassen. Wer photometrische Arbeiten ausführt, muß also die Empfindlichkeit seiner Augen prüfen.

[1]) K. S. GIBSON u. E. P. T. TYNDALL, Sc. Pap. Bur. Stand. 19, 131. 1923.

[2]) W. W. COBLENTZ u. W. B. EMERSON, ebd. 14, 168. 1917. — F. HENNING

Zur Bestimmung der Empfindlichkeitskurve bedarf es der Kenntr der Energieverteilung der zu messenden Lichtquelle im Spektrun Am einfachsten bedient man sich des schwarzen Körpers, dessen Gesam strahlung S durch das STEFAN-BOLTZMANNsche Gesetz und dessen Te strahlung E_λ von der Wellenlänge λ durch die PLANCKsche Gleichun gegeben ist, die sich im sichtbaren Gebiet, auf das man sich hier beschränk auf die WIENsche reduziert: $S_T = \int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda = \sigma T^4$ und $E_{\lambda, T} = C \lambda^{-5} e$ ...

Sind nun einerseits die Energiewerte der verschiedenen Farben b rechnet, andererseits ihre Helligkeiten H_λ mit dem Flimmerphotomet gemessen, so ergibt sich $\varphi(\lambda) = H_\lambda / E_\lambda$.

Eine Lampe ist um so wirtschaftlicher, je größer die sichtbare Energ im Verhältnis zur Gesamtstrahlung ist. Als optischen Wirkungsgr (energetische Ökonomie, luminous efficiency) bezeichnet man d Quotienten: $\frac{1}{S}\int_{0,4\,\mu}^{0,75\,\mu} E_\lambda \, d\lambda$ und als visuellen Wirkungsgrad (photometrisc Ökonomie, reduced luminous efficiency) den Quotienten

$$\frac{1}{S}\int_{0,4\,\mu}^{0,75\,\mu} E_\lambda \, \varphi(\lambda) \, d\lambda = \frac{1}{S}\int_{\text{viol.}}^{\text{rot}} H_\lambda \, d\lambda$$

welcher für die in Lichtempfindung umgesetzte Energie maßgebend is Zur Messung des optischen Wirkungsgrads trennt man die sichtba Strahlung von der unsichtbaren durch ein Filter aus einer Lösung v Ferroammoniumsulfat[3]) oder durch Blenden[4]) und beobachtet die g trennten einzeln mit dem Bolometer oder der Thermosäule.

Bei der Bestimmung des visuellen Wirkungsgrades ist außer d Gesamtstrahlung diejenige Teilstrahlung zu messen, die in Lichtem findung umgesetzt wird. Hier kann man wiederum ein Filter benutze das jedoch nun aus der sichtbaren Strahlung die einzelnen Welle längen in demselben Maße herausschneiden muß, wie es die Empfindlic keitskurve des Auges angibt. Die Zusammensetzung von Lösungen f solche Filter haben u. a. KARRER[5]), IVES und KINGSBURY[6]) sow CONRAD[7]) angegeben. Der erste Forscher benutzte dazu ein Quar gefäß, in dem sich drei je 1,4 cm dicke Schichten folgenden Gehalt

[3]) H. LUX, Illuminat. Engineer 1, Nr. 2 1908. — G. LEIMBACH, Diss. Götting 1910.

[4]) W. E. FORSYTHE, Phys. Rev. 34, 332. 1912.

[5]) E. KARRER, ebd. 5, 189. 1915.

[6]) H. E. IVES u. KINGSBURY, ebd. 6, 319. 1916

befinden: 41,085 g/l Kupferchlorid, 0,8346 g/l Kaliumbichromat und 5,8712 g/l Eisenchlorid. IVES[8]) schlägt eine Lösung von 61,25 g Kupferchlorid, 14,5 g Kobaltammoniumsulfat und 1,9 g Kaliumbichromat im Liter vor.

Wird nun einerseits unter Benutzung eines solchen Absorptionsgefäßes die Strahlung einer Lichtquelle mit dem Bolometer oder dem Thermoelement gemessen, andererseits der Lichtstrom mit dem Photometer, so erhält man das Verhältnis, das als mechanisches Lichtäquivalent bezeichnet wird. Es beträgt 0,0015 Watt/Lumen, d. h. auf 1 Watt kommen 690 Lm oder 55 HK.

Diese Konstante, die sich auf die maximale Empfindlichkeit des Auges bezieht, ist auch dadurch gemessen worden, daß für eine homogene grüne Strahlung von bekanntem visuellen Wirkungsgrad, der dem Maximum nahekommt, sowohl die Energie als auch das Licht bestimmt wird[9])

Endlich kann man auch den Normalstrahler, den schwarzen Körper, benutzen, dessen Licht, bezogen auf eine bestimmte Temperatur und Fläche, photometriert wird, während man die Energie nach der WIENschen Gleichung und der Empfindlichkeitskurve des Auges berechnet. Dieses Verfahren macht von keiner Messung der Energie Gebrauch und liefert trotzdem genaue Werte dafür. Es hat bisher jedoch noch an hinreichend sicheren photometrischen Messungen für den schwarzen Körper gefehlt. Die auf diesem Gebiete vorliegenden Ergebnisse haben u. a. A. R. MEYER[10]), IVES und KINGSBURY[11]), LUMMER[12]), COBLENTZ und EMERSON[13]), HENNING[14]) zur Berechnung des mechanischen Lichtäquivalents benutzt und zum Teil durch Beobachtungen ergänzt.

Sechsunddreißigstes Kapitel.

Objektive Photometrie.

Wir übergehen hier die Strahlungsempfänger, die für das ganze Spektrum brauchbar sind; sie werden bei den Strahlungsmessungen behandelt. Hier soll nur auf die Empfänger für kurze Wellen eingegangen werden, wo hauptsächlich die Selen- und die lichtelektrische Zelle in Betracht kommen.

---

[8]) H. E. IVES, Journ. Franklin Inst. 188, 223. 1919.

[9]) H. E. IVES, W. COBLENTZ u. E. F. KINGSBURY, Phys. Rev. 5, 209. 1915.

[10]) A. R. MEYER, Verh. D. Phys. Ges. 1915, 384.

[11]) H. E. IVES u. E. F. KINGSBURY, Phys. Rev. 8, 177. 1916.

[12]) O. LUMMER, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik, 2. Aufl. 1918.

[13]) W. W. COBLENTZ u. W. B. EMERSON, Bull. Bur. Stand. 14, 255. 1917.

Die erstere beruht darauf, daß der elektrische Widerstand des Selen auf $^1/_{10}$ bis $^1/_{15}$ abnehmen kann, wenn es beleuchtet wird. Dies entsprich dem Verhalten bei Temperaturänderung bei einer solchen von 20° auf 0 wächst der Widerstand auf das Dreifache. Für ein Photometer ist di Selenzelle bisher wenig geeignet gefunden, weil ihre Empfindlichkei sehr von der thermischen Behandlung abhängt und die Wirkung von de Wellenlänge und der Stärke der zu messenden Strahlung beeinfluß wird. Außerdem ist die Zelle träge, und es dauert lange Zeit, bis si nach der Bestrahlung in den Anfangszustand zurückkehrt. Einzel kristalle des Metalls scheinen am empfindlichsten zu sein, doch zeige sie die erwähnten Mängel in erhöhtem Maße. Die maximale Empfindlich keit liegt im Rot. Auch aus diesem Grunde eignet sich die Selenzell wenig als Photometer und findet wohl nur zur Untersuchung homogene Lichts mit Nullmethoden beschränkte Anwendung[1]).

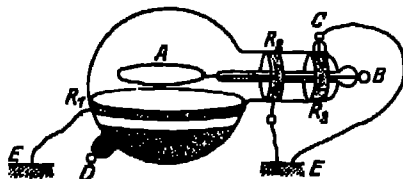



Fig. 217. Photozelle.

Von größerer Bedeutung für die Photometrie sind die Alkalimetallzellen Die große hydrierte Oberfläche des Metalls, das sich in einem evakuierte Kolben aus Glas oder Quarz von etwa 5 cm Durchmesser befindet, wir elektrisch negativ durch eine Batterie kleiner Akkumulatoren ode Trockenelemente (bis 240 V) geladen und gibt diese Ladung unter den Einfluß der Beleuchtung ab [ELSTER und GEITEL 1893[2])]. In Fig. 21 bezeichnet K das auf der versilberten Kolbenwandung niedergeschlagen Metall, zu dem der eingeschmolzene Platindraht D mit dem negative Pol der Batterie die Verbindung herstellt. A ist die ringförmige Kathode deren Stiel, durch ein Glasrohr geschützt, bei B eingeschmolzen ist und zu dem Galvanometer oder Elektrometer führt. Von da fließt die negativ Ladung zur Erde. R_1 und R_2 sind Schutzringe aus Stanniol, die außer auf den Kolben geklebt sind, und R_3 ein im Innern niedergeschlagene Silberring, der ebenso wie R_1 und R_2 geerdet wird. Die Schutzringe ver hindern, daß sich die Ladung längs der Glasoberfläche ausbreitet, und

[1]) H. RIES, Das Licht in seinen elektrischen und magnetischen Wirkunge Leipzig 1909 — O. DIETERICH, Phys. Rev. 4, 467. 1914 u. 8, 191. 1916.
[2]) J. ELSTER u. H. GEITEL, Phys. ZS. 1913, 741; 1920, 361. — F. GOOS, ZS

setzen die Nachwirkung und den Dunkeleffekt herab. Da Wasserstoff, der anfangs unter Glimmentladung zur Hydrierung dient, allmählich absorbiert wird, pumpt man ihn ab und füllt mit Argon oder Helium von 0,5 bis 2 mm Quecksilberdruck. Für den Gebrauch wird die Zelle in einen dichten geerdeten Metallkasten eingeschlossen, dessen Luft durch ein Trockenmittel gut isolierend erhalten wird; das Licht fällt durch ein Fenster ein. Zwischen Batterie und Zelle wird ein Widerstand aus Xylol oder Graphit geschaltet.

Mit dem Elektrometer lassen sich Beleuchtungen bis zu $5 \cdot 10^{-4}$ Lx beobachten; oberhalb 1 Lx läßt sich ein Spiegelgalvanometer verwenden und weiter hinauf ein Zeigerinstrument. Sinkt die Beleuchtung unter

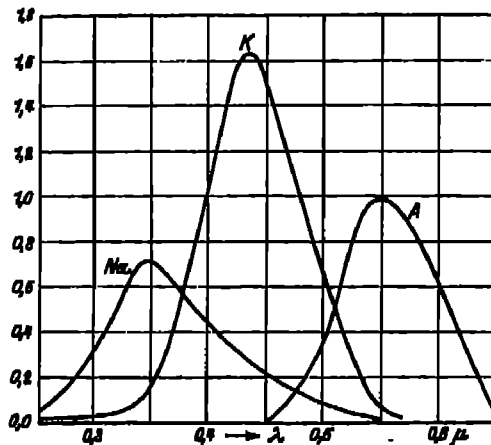



Fig. 218. Empfindlichkeitskurven.

0,001 Lx, so werden die Photoströme von 10^{-14} bis 10^{-18} Amp. aus der Aufladungszeit des Elektrometers bestimmt (S. 250). Die Empfindlichkeit wird noch vergrößert, wenn die Zelle als schwarzer Körper ausgebildet wird, indem das Alkalimetall mit Ausnahme einer kleinen Fläche, durch die das Licht eingelassen wird, die ganze Innenseite des Kolbens bedeckt.

In weiten Grenzen besteht nahezu Proportionalität zwischen Photostrom und Beleuchtung. Das Maximum der Empfindlichkeit zeigt sich für[3])

	Na	K	Rb	Li
bei	0,34	0,435	0,48	0,28 μ.

Fig. 218 zeigt die Empfindlichkeitskurve für eine Kalium- und eine Natriumzelle sowie diejenige des Auges (A).

---

[3]) R. Pohl u. P. Pringsheim, Die lichtelektrischen Erscheinungen. Braun-

Statt den durch den Photostrom bewirkten Galvanometerausschl
zu beobachten, kann man jenen Strom auch kompensieren und
Stärke des Kompensationsstromes messen[4]. Auch wird die Photoz
als Indikator benutzt, indem die beiden zu vergleichenden Lichtque
durch den rotierenden Sektor oder durch Polarisation einander glei
gemacht werden. Bei der Untersuchung von schwachen Lichtquell
z. B. von Sternen, wird die Empfindlichkeit durch Verstärker vergröß

Bei dem lichtelektrischen Verfahren wird das Licht durch Elektrizitä
mengen gemessen. Deshalb eignet sich die Methode zur Bestimmu
von Integralwerten über eine längere Zeit In dieser Weise hat sie z
Anwendung gefunden zur Untersuchung der Phosphore (LENARD 191
Ferner wird die Photozelle bei dem KOCHschen Mikrophotometer
nutzt, mit welchem die Schwärzung photographischer Platten gemess
wird (1912).

---

[4]) H. v. HALBAN u. H. GEIGEL, ZS. phys. Chem. 96, 214. 1920

TECHNIK DES EXPERIMENTS

VON

ERNST VON ANGERER

Einleitung.

Der Experimentalphysiker ist nicht selten genötigt, Arbeiten auszuführen, die in das Fach des Handwerkers schlagen· des Mechanikers, des Glasbläsers, Schreiners, Photographen. Er unterzieht sich dieser Aufgabe, sei es, um nicht den Fortgang seiner Arbeit durch das Warten auf Ablieferung des bestellten Stückes zu hemmen, sei es, um sich selbst erst während der Herstellung über die beste Konstruktion schlüssig zu werden oder um, dank seiner höheren Intelligenz, die Arbeit des Handwerkers zu übertreffen. Es muß also dem Physiker geraten werden, sich eine gewisse Fertigkeit in der Bearbeitung von Holz, Metall, Pappe und Glas, in der photographischen Technik usw. anzueignen.

Ein vortreffliches kleines Lehrbuch für diese manuellen Geschicklichkeiten ist das „Handfertigkeitspraktikum" von A. WEHNELT[1]) Im folgenden wird einige Vertrautheit mit dieser Materie, deren Behandlung den Rahmen dieses Buches überschreiten würde, vorausgesetzt. Die modernen Experimentaluntersuchungen erfordern aber vielfach eine über die Fertigkeiten des Handwerkers hinausgehende Technik, die teils in langjähriger Institutstradition ausgebildet, teils in zahlreichen Bemerkungen der neueren Literatur angegeben wurde, und die im folgenden möglichst vollständig dargestellt werden soll.

---

[1]) A. WEHNELT, „Das Handfertigkeitspraktikum". Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn. 1920.

Erstes Kapitel.

Einige Werkstoffe von physikalischer Bedeutung.

1. Wolfram.

Nachdem COOLIDGE[1]) eine Methode angegeben hat, nach der di
so außerordentlich schwer bearbeitbare Metall in massiven Barren
dünnen Drähten erhalten werden kann, ist die Bedeutung desselben für
physikalische Technik sehr groß geworden. Die neueren Forschun
über Wolfram sind erschöpfend zusammengestellt in einer kürzlich
schienenen Monographie von ALTERTHUM[2]), der die meisten der folgen
Angaben entnommen sind

Das spezifische Gewicht von reinem Wolframmetall beträgt 19,3
seine Härte 4,5 bis 8 (Quarz = 7). Wolfram läßt sich daher (in
Regel) nicht feilen oder sägen, sondern kann nur durch Schleifen
arbeitet werden. Wegen seiner Härte und chemischen Unangreifbar
wurde empfohlen, Normalgewichte daraus herzustellen. Die Kompress
lität ist (bei 20°) $0{,}28 \cdot 10^{-6}$ pro Megabar (Kupfer [$0{,}76 \cdot 10^{-6}$] ist
2,7 mal kompressibler). Der Elastizitätsmodul ist 40 000 kg/mm²;
Iridium hat einen höheren Modul (52 900). Man könnte Wolfram
(unmagnetisches) Material für Unruhfedern verwenden. Der Torsic
modul beträgt 17 100 kg/mm². Beide Moduln ändern sich bis 800°
wenig. Die Zerreißfestigkeit ist ca. 400 kg/mm². Ein Draht von 1
Durchmesser reißt also erst bei einer Belastung von ca. 30 g.

---

[1]) COOLIDGE, Trans. Amer. Inst. El. Eng 29, 961 1910. — Der Freundlich
von Herrn Dr. W. ROHN (W. C. HERAEUS) verdankt Verf. folgende Angal
Wolframsäure wird, fein gebeutelt, im Wasserstoffstrom bei 900° zu lichtgra
Metallpulver reduziert. Dieses beutelt man wieder fein und preßt es in einer F
aus gehärteten Stahlplatten mit Drucken von ca. 1500 kg/cm² zu Stäben c
Platten, die bei 1200—1400° im Wasserstoffstrom gesintert werden, wodurch
weniger zerbrechlich werden. Die vorgesinterten Rohlinge werden hierauf
1950—2200° eine Stunde lang in reinstem Wasserstoff „hoch gesintert", dann
ca. 1600° gehämmert und gewalzt. Dabei erhitzt man anfangs nach jedem Bear
tungsvorgang aufs neue, nach dem 4. oder 5. läßt man die Temperatur allmäh
bis auf 100° sinken. — Molybdän wird ebenso bearbeitet.

[2]) H. ALTERTHUM, „Wolfram". Sammlung Vieweg, Heft 77, 1925.

[3]) W. GEISS und J. A. M. VAN LIEMPT, Ann. d. Phys. 77, 105. 1925. W. F. FORSYT
und A. G. WORTHING, Astrophys. Journ. 61, 146, 1925.

Bei der Firma Pintsch-Berlin wurde ein Verfahren ausgearbeitet, die Wolframteilchen der nach dem „Spritzverfahren" hergestellten Fäden durch lokales Erhitzen so zu ordnen, daß Drahtstücke erhalten werden, die aus einem einzigen, mehrere Dezimeter langen Kristall bestehen. Derartige Drähte sind frei von elastischer Nachwirkung und befolgen streng das HOOKEsche Gesetz. Das Pintschverfahren versagt bei Durchmessern, die einige Zehntel Millimeter überschreiten, und benötigt einen Zusatz von 1—2% Thoroxyd. — Wolframdrähte lassen sich bis 5 μ ziehen[4]). Nach SAMTER und SCHRÖTER[5]) kann man den Durchmesser von Wolframdrähten von 15 μ auf etwa 7 μ verringern, wenn man sie $^3/_4$ Minuten in einer Natriumnitrit-Nitrat-Schmelze von 340° ätzt.

Die wichtigsten Anwendungen ergeben sich aus dem hohen Schmelzpunkt von Wolfram — dem höchsten von allen Metallen. Nach den besten Messungen schmilzt Wolfram bei 3668° abs. (3395° C.) $\pm$ 20°. Eine Dampfdrucktabelle von 2000—5110° von LANGMUIR findet sich bei ALTERTHUM. — Der Wärmeausdehnungskoeffizient bei Zimmertemperatur beträgt 4,3—4,6 $\cdot$ 10^{-6}. Zwischen 300 und 2700° abs. wird die Länge L_t eines Wolframstabes dargestellt durch die Formel: $L_t = L_0\,(1 + 4{,}44 \cdot 10^{-6}\,(T - 300) + 4{,}5 \cdot 10^{-11}\,(T - 300)^2)$. Die Wärmeleitfähigkeit ist 0,4 cal/cm·grad, also noch etwas größer wie die von Kupfer. Deshalb, wegen seiner Härte, seines geringen Dampfdruckes (und seines niedrigen Preises) ist Wolfram als Material für Unterbrecherkontakte dem Platin vorzuziehen. — Die spezifische Wärme ist 0,035 cal/grad.

Der elektrische Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt ist 0,05—0,06 Ohm (je nach Vorbehandlung), der Temperaturkoeffizient zwischen 0 und 23° 4,8 Promille, also um etwa 30% größer als von Platin. Beim Erwärmen eines Drahtes von Zimmertemperatur auf 1000° (2000°) steigt sein Widerstand auf das 6,0 (12,7) fache.

Bei Zimmertemperatur wird Wolfram merklich nur von Fluor angegriffen. Von 900° ab bildet sich in sauerstoffhaltiger Atmosphäre ein sofort verdampfendes gelbes Oxyd. Wasserstoff wird an glühendem Wolfram in Atome zerlegt. Ein im Vakuum glühender Wolframdraht wird durch Spuren von Wasserdampf in kurzer Zeit zerstört, und zwar durch folgende Reaktionen[6]): Zuerst reagiert der Wasserdampf mit dem glühenden Metall, es bildet sich H_2 und das erwähnte flüchtige Oxyd (W_2O_5). Dieses schlägt sich auf der Glaswand nieder, H_2 wird dissoziiert

---

[4]) C. G. FINK, Ztschr. f. angew. Chem. 25, 2462. 1912. (Referat über Arbeiten der General Electric Co. Harrison.)

[5]) W. Samter und K. Schröter, Ztschr. f. techn. Phys. 6. 205 1925

und der atomare Wasserstoff reduziert das Oxyd, es bildet sich
zurück und der Vorgang beginnt wieder von vorne.

Elektrolytische Überzüge von Wolfram auf Eisen erhielten M
und HALVORSEN[7]) sowie VAN LIEMPT[8]) unter Verwendung von Lithi
chlorid als Elektrolyt und Anoden aus Wolfram. (Vergl. 12. Kapi

Wolfram läßt sich praktisch nicht amalgamieren und nicht verzi
(und daher nicht weich löten) Das Hartlöten gelingt mit Neusilber
Borax als Flußmittel.

Bezugsquelle z. B. Bayerische Metallwerke A.-G., Landshut, Kl
mühle; Wolfram-Laboratorium Dr. Paul Schwarzkopf, Berlin W
Steglitzerstr. 11 — Preis: 1 kg ca. 300 M.

Wolframlegierungen zeichnen sich vor allem dadurch aus, daß
ihre große Härte bis zur hellen Rotglut beibehalten. Hervorgehoben
die von den vereinigten Edelstahl-Werken Dortmund hergestellte
gierung „Akrit" von der (ungefähren) Zusammensetzung 38 Co, 30
16 Wo, 10 Ni, 4 Mo und 2—5 C. Wolframkarbid steht dem Diamant
an Härte nur wenig nach (Härtegrad 9,5 wenn Diamant = 10). Es
unter dem Namen Volomit von der Hartmetall G. m. b. H., Berlin N
Fehrbellinerstr. 81, unter der Bezeichnung Tizit von der Ges. f. Wolfr
industrie Berlin N 39, Sellerstr. 39 in Handel gebracht. Schmelzpun
2300 bis 2400°.

2. Molybdän.

Molybdän hat ähnliche physikalische Eigenschaften wie Wolfr
dem es auch chemisch nahesteht. Es ist weicher als dieses und läßt
schmieden. Bei Zimmertemperatur oxydiert es sich langsam, rasch
Temperaturen uber 600°. Sein Schmelzpunkt liegt[9]) bei 2622 ± 10
Sein Wärmeausdehnungskoeffizient wird zu $4,9 \cdot 10^{-6}$ angegeben. N
Messungen im Bureau of Standards folgt die Ausdehnung zwisc
39 und 305° der Formel $L = L_0 \; (1 - 5,01 \cdot 10^{-6} \cdot t - 0,00138 \cdot 10^{-6} \cdot$
Bezugsquelle: z. B. Wolfram-Laboratorium Dr. Paul Schwarzkopf, Be
W 35, Steglitzerstr. 11.

3. Nickelstähle.

Die Eisen-Nickel-Kohlenstoff-Legierungen zeichnen sich je nach ih
Zusammensetzung durch verschiedene wertvolle Eigenschaften
Berühmt geworden ist der von GUILLAUME untersuchte 35,6 proz. Nic
stahl, das „Invar", dessen Wärmeausdehnungskoeffizient nur 1,2 · 1

[7]) MANN u. HALVORSEN, Trans. Amer. El. Soc. 45, 14. 1922.
[8]) J. A. M. VAN LIEMPT Ztschr. f. Elektrochem. 31, 249. 1925.

beträgt. Neuerdings gibt GUILLAUME an[10]), daß es durch geeignete mechanische und Wärmebehandlung dieser Legierung gelingt, ihren Ausdehnungskoeffizienten praktisch auf 0 zu bringen.

Bezugsquelle für Invar: Société Genevoise (Genf); Friedr. Krupp, Gußstahlfabrik Essen.

Durch einen Zusatz von 12% Cr zu der Invarlegierung erreichte GUILLAUME, daß der Temperaturkoeffizient des Elastizitätsmoduls = 0 wurde: „Elinvar"[10]).

Der Kruppsche Chromnickelstahl V_2A besitzt eine so hohe Widerstandsfähigkeit gegen chemische Reagenzien, daß er in vielen Fällen Platin ersetzen kann. Wenn er in der Flamme geglüht wird, so oxydiert er sich allerdings stark.

Eine Legierung aus den ferromagnetischen Komponenten Eisen (27%) und Nickel (73%) ist unmagnetisch.

Bezugsquelle: Friedr. Krupp, Gußstahlfabrik Essen; für V_2A-Draht: „Westfälische Drahtindustrie in Hamm (Westfalen)".

4. Ein Leichtmetall

von vorzüglichen Eigenschaften ist das „Elektrometall" der chemischen Fabrik Griesheim-Elektron. Die Legierung besteht aus ca. 90% Magnesium und ca. 10% Zink, etwas Aluminium und Mangan. Ihre physikalischen Konstanten sind: Spezifisches Gewicht: 1,83 (1,84) Elektrische Leitfähigkeit: Ein Draht von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt hat 0,059 (0,077) Ohm. Temperaturkoeffizient: 0,38% pro Grad. Wärmeleitfähigkeit 0,32. Zugfestigkeit (gewalztes Blech) 30 (32—39) kg/mm^2. Spezifische Wärme: 0,24 (0,24).. Wärmeausdehnung: 0,000027. Schmelzpunkt 635° (630°). Die erste der angegebenen Zahlen bezieht sich auf die Legierung „Z 1", die besonders für mechanische Bearbeitung geeignet ist, die zweite, eingeklammerte Zahl auf die Legierung „AZM" von besonders hoher Festigkeit. Eine dritte Legierung „CM" eignet sich besonders für Stromleiter. Elektrometall überzieht sich an der Luft mit einer schützenden Oxydhaut. Gegen Säuren (auch schwache) ist es sehr empfindlich, kann aber durch einen Speziallack geschützt werden. Löten läßt es sich nicht.

5. Quecksilber.

Eigenschaften und Verwendung von Quecksilber können als bekannt angenommen werden. Erwähnt sei die neueste Bestimmung seines spezifischen Gewichtes bei 0° durch SCHEEL und BLANKENSTEIN[11]):

[10]) CH. ED. GUILLAUME, „L'invar et l'elinvar". Les prix Nobel en 1919—1920. 1922.

Der wahrscheinlichste Wert ergab sich zu 13,59546. Eine Tabelle der (Logarithmen der) Dampfdrucke als Funktion der Temperatur findet sich z. B. bei KNUDSEN[12]). Einige Werte daraus seien im Hinblick auf die Bedeutung für die Vakuumtechnik hier herausgegriffen:

Temp.	+ 20°	+ 10	0	— 10
Druck	$1{,}19 \cdot 10^{-3}$	$4{,}85 \cdot 10^{-4}$	$1{,}85 \cdot 10^{-4}$	$6{,}52 \cdot 10^{-5}$

Temp.	— 20	— 80°	— 190°
Druck	$2{,}12 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}[13])	10^{-27}[13]) mm Hg.

Das im Laboratorium vorhandene Quecksilber ist vielfach durch Spuren gelöster Metalle verunreinigt. Diese können entfernt werden, da sie a) teils leichter oxydabel, b) teils schwerer flüchtig sind als Quecksilber. Zu a). Durch ein bis zum Boden in das Gefäß eingesenktes Glasrohr wird Luft durch das Quecksilber gepreßt. Nach einigen Stunden sind die verunreinigenden Metalle oxydiert worden und bleiben bei Filtration als grauer Schlamm auf dem Filter zurück. — Oxydation durch Salpetersäure. Apparat Fig. 1. Der Trichter T hat ein ca. 20 cm langes Rohr mit umgebördelter Mündung, über die ein Stück „sämisch gegerbtes" Leder gebunden wird. Das Rohr U (Länge 1—1½ m, Durchmesser 3—4 cm) wird bis zur Höhe h_1 mit reinem Quecksilber gefüllt, bis h_2 mit 10proz. Salpetersäure. Gießt man das zu reinigende Quecksilber in den Trichter T, so wird es durch die Poren des Leders gepreßt und ein Regen feiner Tröpfchen fließt durch die hohe Salpetersäureschicht.

b) Noch intensiver wird das Quecksilber durch Destillation im Vakuum gereinigt Stark verschmutztes Quecksilber soll jedoch vorher nach a) behandelt werden. Brauchbare Apparate werden u. a. von Leybolds Nachf., Köln, von W. C. Heraeus, Hanau (elektrische Heizung mit selbsttätiger Temperaturregulierung), auch von Fameda A.-G., Berlin und R. Goetze, Leipzig, gebaut[14]). Es empfiehlt sich, die Destillation in hohem Vakuum und bei möglichst tiefer Temperatur vorzunehmen. (GAEDE hat z. B. einen Apparat angegeben, der von Leybold gebaut wird, bei dem das Quecksilber bei Zimmertemperatur verdampft und sich an einer mit festem CO_2 gekühlten Wand verdichtet.) Einen selbst hergestellten, seit Jahren benützten Apparat der üblichen Bauart zeigt Fig. 2. Das Quecksilber wird in dem Rohr R erwärmt, der Dampf strömt durch ein weites, kurzes Verbindungsstück in den Kühler K, an

---

[12]) M. KNUDSEN, Ann. d. Phys. 29, 179. 1909.

[13]) Aus der angegebenen Formel extrapoliert.

[14]) Literatur: W. ROHN, Ztschr. f. Instr. Kde 34, 349. 1914. S. VALENTINER, Ztschr. f. techn. Phys. 2, 260. 1921. A. ELIÇABE, Phys. Ztschr. 22, 120. 1921. J. WETZEL, Ztschr. f. techn. Phys. 6, 155 1925. P SEDERHOLM, Ark. f. Mat. och Fys. 18, 11. 1925

dessen Wänden er sich kondensiert. R ist mit feinem Konstantandraht bewickelt, dessen Enden mit der Lichtleitung verbunden werden, und mit Asbestschnur thermisch isoliert. Das Steigrohr s und das Fallrohr f sind Kapillaren von ca. 2 mm Innendurchmesser. Um den Apparat zum erstenmal in Betrieb zu setzen, gießt man Quecksilber in G und

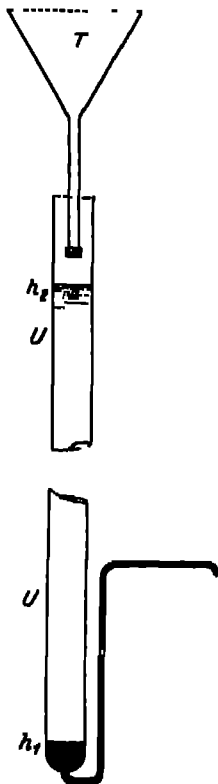



Fig. 1. Quecksilberreinigung.

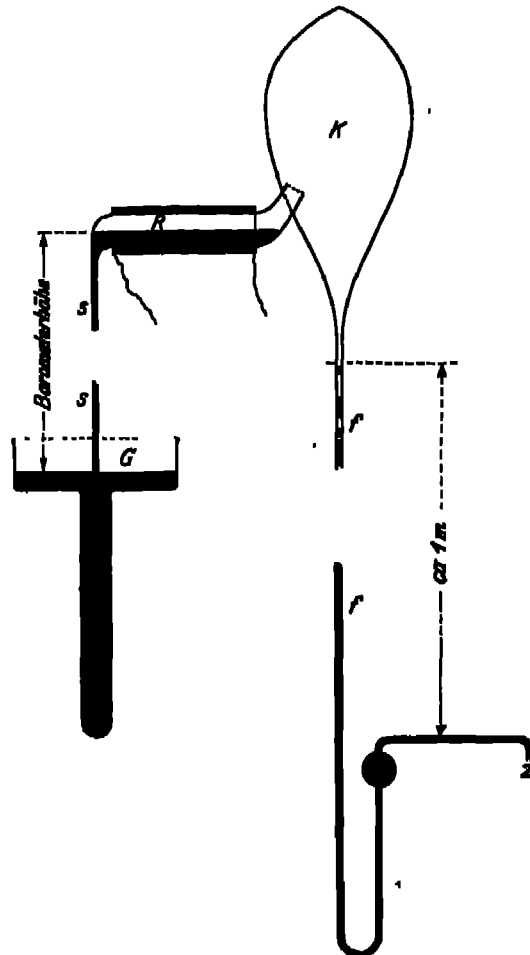



Fig. 2. Quecksilberdestillierapparat.

schließt an die Öffnung Z eine Pumpe (rotierende Gaedepumpe) an. Das Quecksilber steigt beim Evakuieren nach R, destilliert nach Schließung des Heizstromes und füllt f und die bei Z angeblasene Kugel. Dann kann die Pumpe entfernt werden. Das tropfenweise an der Wand von K herabfließende Quecksilber schiebt (nach dem SPRENGELschen Prinzip)

ein sehr hohes Vakuum. Der Apparat steht gefüllt und evakuiert ber
wird bei Bedarf durch Einschalten des Stromes in Tätigkeit gesetzt u
braucht stundenlang keine Wartung.

Nach JAEGER[15]) kann Quecksilber auch durch Elektrolyse gerein
werden. Als Elektrolyt dient eine angesäuerte Lösung von Merku
nitrat. Anode ist das zu reinigende Quecksilber in einem weiten Gef
Kathode ein Platinblech in einer in demselben Gefäß stehenden kleinen
Schale. Stromstärke: 10 Milliampere pro cm². Die Methode ist a
scheinend nicht so verbreitet wie die Reinigung durch Destillation.

Quecksilberdampf ist bekanntlich sehr gesundheitsschädlich, Que
silbersalze zählen zu den stärksten Giften.

6. Leichtschmelzende Legierungen.

Nach ROSE: 2 Gewichtsteile Wismut, 1 Blei, 1 Zinn. Schmelzpunk
94°. Den niedrigsten Schmelzpunkt von 65,5° hat eine der Form
$Cd_4\,Pb_8\,Bi_8\,Sn_8$ entsprechende Legierung von 4,5 Gewichtsteilen Ka
mium, 10,3 Blei 10,4 Wismut und 6,0 Zinn[16]). (WOODsches Meta

7. Alkalimetalle.

Die schwereren Alkalimetalle sind so stark oxydabel, daß sie sich
der Luft spontan entzünden; deshalb erfordert ihre Herstellung, Rei
gung und Verwendung eine besondere Technik. In der Tabelle sind d
Metalle geordnet nach steigender Oxydierbarkeit (Gefährlichkeit), st
gendem spezifischem Gewicht s und abnehmendem Schmelzpunkt
In der Spalte λ ist die Wellenlänge (in Å. E.) angegeben, bei der d
Maximum des selektiven lichtelektrischen Effektes liegt[17]).

	s	t	λ
Lithium	0,53	186	2800
Natrium	0,97	97,5	3180
Kalium	0,86	63	4360
Rubidium	1,52	39	4800
Cäsium	1,88	27	5100

Die Alkalimetalle werden in Gläsern mit Petroleum überschichtet b
zogen, Lithium und Natrium in Barren, Kalium in kirschgroßen Kugel

a) Lithium ist ungefähr so hart wie Blei. Eine frische Schnittfläc
läuft zwar sofort an, doch hält sich ein Stück Metall mehrere Stunden a
der Luft, ohne ganz oxydiert zu sein. Bei seinem (verhältnismäßig hoc
liegenden) Schmelzpunkt ist es dagegen sehr reaktionsfähig: Glas- un
Quarzgefäße zerstört es beim Schmelzen unter Aufglühen, mit Koh
bildet es unter Feuererscheinung ein Karbid, ebenso legiert es sich m

[15]) JAEGER, Ztschr. f. Instr.Kde 12, 354. 1892.

[16]) Vgl. M. v. SCHWARZ, „Legierungen", Stuttgart, F. Enke, 1920.

[17]) F. GROSS, Ztschr. f. Phys. [illegible]

Platin. In Eisentiegeln kann es jedoch geschmolzen und (im Vakuum) auf Rotglut erhitzt werden. Im hohen Vakuum auf eine reine Glasfläche sublimiert bildet es prachtvoll indigoblau durchscheinende Spiegel.

b) Natrium und Kalium. Einfachste Reinigungsmethode: Ein Stückchen Metall wird flüchtig in zweimal gewechseltem. reinem Benzol (oder Benzin oder Xylol) gebadet, um das anhaftende Petroleum einigermaßen zu entfernen, auf einer Filtrierpapierunterlage rasch die Oxydkruste mit dem Messer entfernt und das Metall sofort in das dünnwandige, mindestens 20 cm lange Rohr Fig. 3 geworfen. Man schmilzt sogleich bei A ab und evakuiert. Hierauf erwärmt man das Metall vorsichtig mit der flatternden Flamme, bis es plötzlich silberglänzend und unter Zurücklassung einer dicken Oxydhaut durch das Röhrchen B in die Apparatur fließt. Hierauf wird das Rohr durch Abschmelzen bei B von der Apparatur getrennt.

Fig. 3

Fig. 4

Reinigung von Alkalimetallen.

Zweite Methode: Das nach der ersten Art gewonnene Metall enthält große Mengen von Wasserstoff — Natrium das 237fache, Kalium das 126fache seines Volumens. Um es hiervon einigermaßen zu befreien, wirft man es (nach Entfernung der Oxydkruste wie oben) in ein Rohr Fig. 4, schmilzt wieder bei A ab, evakuiert und erhitzt M unter ständigem Pumpen etwa $^1/_2$ Stunde auf 200—300° (am besten in einem kleinen elektrischen Ofen). Nach dem völligen Erkalten sprengt man das Rohr dicht über M ab und wirft das Stück M mit der Mündung nach unten in ein Rohr von der Form der Fig. 3. Weiter verfährt man man wie bei der ersten Methode.

Dritte Methode: Am wirksamsten lassen sich die Alkalimetalle Natrium bis Cäsium durch Destillation im hohen Vakuum reinigen. Sie destillieren (in Glasgefäßen) sehr leicht, auch durch ziemlich enge Abschmelzstellen hindurch. Man kann eventuell eine Reihe von Kugeln, die je durch eine Abschmelzstelle getrennt sind, hintereinander anbringen und das Metall schrittweise hindurchdestillieren.

c) Kalium, Rubidium und Cäsium werden am besten erst in der evakuierten Apparatur aus den Chloriden reduziert[18]). Man mischt

1 g „Calciummetall, geraspelt" mit 3,7 g Kaliumchlorid bzw. Rubidiumchlorid bzw. 9,0 g Cäsiumchlorid, füllt die Mischung in ei einen Ende geschlossenes Eisenrohr P (Fig. 5), schiebt dieses in da zeichnete Rohr aus schwerschmelzbarem Glas und schmilzt das I des Rohres ab. Nach dem Evakuieren erhitzt man P auf Rotglut. Chlorid wird langsam reduziert, das Alkalimetall destilliert bis zu Knie K und kondensiert sich dort zu großen Tropfen. Mit den angegebenen Mengen erhält man bei völliger Ausnützung 1,7 g Ka bzw. 4 g Rubidium bzw. 6,5 g Cäsium. Hat sich in der knieförm Biegung eine hinreichende Menge M kondensiert, so erwärmt man das Glasr das Metall schmilzt und läuft durch vorher etwas angewärmten, mit Siegel

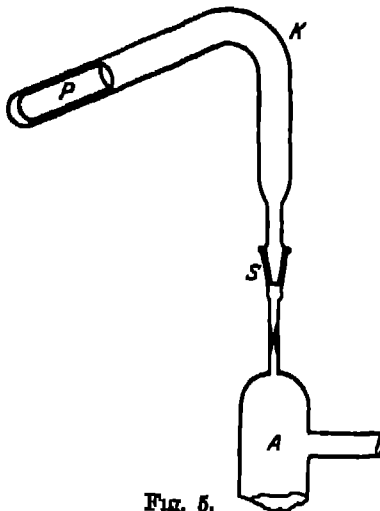
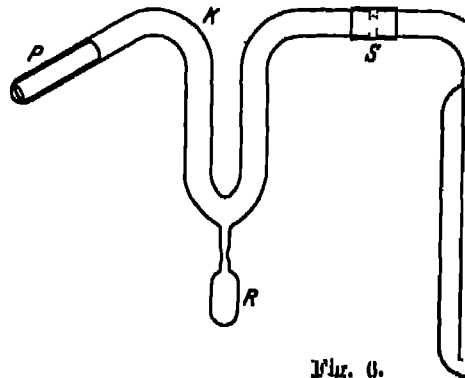



Fig. 5. Fig. 6.
Darstellung von Alkalimetallen aus den Chloriden.

gedichteten Schliff S in die Apparatur A (aus gewöhnlichem Gl Statt des Schliffes kann man auch ein Fläschchen R anbringen (Fig. das nach der Füllung abgeschmolzen wird. Dieses wirft man später (der geöffneten Spitze nach unten) in ein Ansatzrohr wie Fig. 3. Da sich das Metall beim Öffnen nicht entzündet, kühlt man es vorher fester CO_2 (in einem Becherglase) und bricht die Spitze in der (Atmosphäre ab. In Fig. 6 ist noch ein Teil der Vakuumleitung gezeichn S bedeutet eine Kittstelle, bei der die Leitung aus schwer schmelzbar Glas endet, V eine „Ausfriertasche" (vgl. S. 385).

Kalium - Natrium - Legierung ist flüssig, wenn sie auf 1 Teil 2—10 Teile K enthält. Sie kann u. a. zur Füllung von Quarzlamp benutzt werden[19]). Um sie herzustellen, schmilzt man Natrium in ei Porzellanschale unter Paraffinöl und bringt 1—2 Kaliumkugeln r

[19]) Vgl. A. Hagenbach, Handb. d. Radiologie (Akad. Verlagsges. Leipzig) 19 Bd. IV S. 943 ; [illegible]

der Schmelze in Berührung. Die Legierung, die in ihrem Aussehen etwas an Quecksilber erinnert (aber sehr geringes spez. Gewicht hat), hält sich längere Zeit an der Luft, ohne sich vollständig zu oxydieren.

Gewöhnliches Glas und Quarzglas werden von heißen Alkalimetallen allmählich unter Bräunung angegriffen; Bleieinschmelzglas dagegen wird geschwärzt und springt. Besser als gewöhnliches Glas hält sich das Jenaer Glas 59^{III}.

8. Glassorten.

EckertT[20]) hat in einer umfangreichen Abhandlung die physikalischen Eigenschaften der Gläser (Dispersion, Absorption, Brechung, Reflexion und elliptische Polarisation, elektrische und magnetische Eigenschaften, Dichte, Wärmeausdehnung, elastische Eigenschaften u. a.) behandelt. Der praktische Physiker wird sich jedoch in der Regel darauf beschränken, von einer Glashütte ein dort erprobtes Glas von besonderen, für seinen Versuch wertvollen Eigenschaften zu beziehen. Über diesen Punkt ist in der erwähnten Arbeit verhältnismäßig wenig zu finden.

a) Pyrexglas (80,7 SiO_2, 14,5 B_2O_3, 3,5 Al_2O_3, 4,1 Na_2O)[21]) wird in den letzten Jahren von amerikanischen Physikern mit Vorliebe zur Herstellung von Entladungsröhren, Quecksilberlampen usw. benutzt. Es ist besonders widerstandsfähig gegen Zerbrechen und gegen schroffen Temperaturwechsel. Pyrexglas ist schwerer schmelzbar als das gewöhnliche Geräteglas, sein Erweichungspunkt liegt jedoch unter 800°, so daß es in der Gebläseflamme mit etwas Sauerstoffzufuhr verarbeitet werden kann. Sein Ausdehnungskoeffizient beträgt nur $4 \cdot 10^{-6}$. Nach Voorhis[22]) ist Pyrexglas bei höherer Temperatur für Helium erheblich durchlässig. Bei 500° z. B. läßt eine Fläche von 1 cm^2 und 1 mm Wandstärke 4,27 mm^3 He pro Stunde durch, wenn auf der einen Seite Vakuum ist, das He auf der anderen Seite dagegen Atmosphärendruck besitzt. — Wolframdrähte lassen sich in Pyrexglas vakuumdicht einschmelzen, es wurden auch schon Fenster aus Quarzglas aufgeschmolzen. — Von chemischen Reagenzien wird Pyrexglas stärker als manche andere Gläser angegriffen. — In Deutschland ist das von den Corningwerken in Amerika hergestellte Pyrexglas nicht erhältlich.

b) Das Borosilikatglas 59^{III} von Schott & Gen., Jena, steht dem Pyrexglase nahe. Seine Zusammensetzung ist: 72 SiO_2, 12 B_2O_3, 5 Al_2O_3, 11 NaO, sein Ausdehnungskoeffizient beträgt $17 \cdot 10^{-6}$. Auch dieses ist bei 450° etwas gasdurchlässig.

[20]) F. Eckert, Jahrb. d. Radioakt. 20, 93. 1923.

[21]) O. Lecher, Chem. Ztg. 44, 469. 1922.

c) Resistaglas. In jüngster Zeit (1925) wird von der Firma K Jenckel, Hamburg 1, Bieberhaus, unter der Bezeichnung „Resista" Glas in den Handel gebracht, das dem Pyrex sehr ähnlich zu sein schei Es hat nahe denselben Ausdehnungskoeffizienten ($3,9 \cdot 10^{-6}$), ist sehr empfindlich gegen schroffen Temperaturwechsel und erweicht wie Py bei ca. 800°. Molybdändraht läßt sich ohne Verbindungsglas halt einschmelzen Die chemische Angreifbarkeit ist geringer als die Pyrexglas.

Von den zahlreichen Spezialgläsern des Glaswerkes Schott & Genoss Jena, seien hervorgehoben[23]):

d) Supremaxglas Ein besonders schwer schmelzendes Natriu Borosilikatglas, eignet sich z. B. für Thermometer bis 675°. Es gestat Einschmelzung dünner Wolframdrähte.

e) Supraxglas. Besitzt ähnliche Vorzüge wie d), etwas leich schmelzend, hohe Widerstandsfähigkeit gegen schroffen Temperat wechsel.

f) Fiolaxglas, von höchster chemischer Widerstandsfähigkeit. Se Löslichkeit ist noch wesentlich geringer als die des berühmten „Jen Glases".

g) Das bekannte Uviolglas wurde durch ein neues Erzeugnis von n größerer Ultraviolettdurchlässigkeit und höherem Schmelzpunkt ül troffen, das besonders für Quecksilber-Starkstromlampen geeignet

Über die optischen Eigenschaften von käuflichen Glassorten ori tieren am besten die Kataloge der großen Glasschmelzereien, z. B. Schott & Gen., Jena.

9. Quarzglas.

Über die Herstellung von Quarzglas vgl. B. Alexander-Katz, „Qua glas und Quarzgut", Sammlung Vieweg, H. 46.

Je nach der Reinheit des Ausgangsmaterials erhält man undur sichtiges, weißes Quarzgut mit rauher, seidenglänzender oder mit gla Oberfläche, oder klar durchsichtiges, nahezu optisch leeres Quarzg Beide Arten lassen sich miteinander verschmelzen. Man kann aus Qua gut verhältnismäßig große, kompliziert gebaute und doch nicht zu te Gefäße herstellen und sie mit angeschmolzenen durchsichtigen Röhr ja sogar einigermaßen optisch planen Scheiben aus Quarzglas als Fenst versehen.

Quarzglas besteht aus reiner Kieselsäure (SiO_2) und wird daher Flußsäure stark angegriffen. Es ist bis 1100° für Thermometer brau

[23]) Die nachstehenden Angaben verdankt Verf. der Firma Schott & Gen. G

bar, evakuierte Röhren halten maximal 1200° aus, ohne eingedrückt zu werden. Die geeignete Temperatur zum Blasen des Glases ist 1600—1700°. (Man benötigt daher ein Knallgas- oder ein Azetylen-Sauerstoffgebläse und eine dunkle Brille; dünne Röhrchen kann man jedoch auch in der Leuchtgas-Sauerstofflamme abschmelzen.) Bei 1800° ist das Glas leichtflüssig und verdampft stark. Sein Ausdehnungskoeffizient ist nur $1{,}5 \cdot 10^{-6}$, und daher rührt die berühmte Unempfindlichkeit gegen schroffen Temperaturwechsel: Man kann glühendes Quarzglas in kaltem Wasser abschrecken, ohne das Springen befürchten zu müssen. Die mechanische Festigkeit (Zerbrechlichkeit) ist dagegen nur ungefähr so groß wie die von Glas. Ein Quarzglasröhrchen läßt sich mit dem „Glasmesser" ritzen wie ein Glasrohr und durch ziehendes Biegen abbrechen wie dieses.

Quarzglas ist schon bei Zimmertemperatur, noch mehr bei hohen Temperaturen für Wasserstoff und besonders für Helium durchlässig[24]): Der Druck in einem mit Wasserstoff gefüllten Gasthermometer nahm mehrere Tage um 0,03 mm pro Tag ab, bei Heliumfüllung sogar um 0,4 mm pro Tag. Bei sechsstündigem Erhitzen eines Quarz-Heliumthermometers auf 1100° sank der Druck von 212 auf 160 mm! Neon diffundiert dagegen wahrscheinlich nicht durch Quarzglas.

Thermometergefäße aus Quarzglas haben den Vorzug, keine thermische Nachwirkung zu zeigen.

Die Ultraviolettdurchlässigkeit von reinem Quarzglas ist nahe ebenso groß wie die von kristallinischem Quarz· Durch eine Platte von 6 mm Dicke werden Spektrallinien von 2000 A.E. noch nicht merklich geschwächt[25]). Platindraht läßt sich in Quarzröhren nicht vakuumdicht einschmelzen. Wohl aber Wolframdraht nach einem der Firma Ulbrich, Jena, patentierten Verfahren. Damit dürften die älteren Methoden zur vakuumdichten Einführung von Elektroden in Quarzrohre[26]) überholt sein.

Bezugsquellen für Quarzglas: Heraeus-Hanau; Hanff & Buest, Berlin; Schott & Gen., Jena; Ulbrich, Jena.

Quarzfäden siehe bei Kap. VII.

Quarzglas als Isolator siehe bei Kap. VIII.

Verbindungsstücke zum Verschmelzen von Rohren aus gewöhnlichem Glas mit Spezialglas oder Quarzglas liefert Schott und Gen.

---

[24]) F. Henning, „Die Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Temperaturmessung", Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1915.

[25]) G. Joos, Phys. Ztschr. 25, 376. 1924. Vgl. auch M. v. Schwarz, ebd. S. 374.

[26]) Vgl. E. v. Angerer, „Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen". Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1924. („Sammlung Vieweg",

10. Reiner Alkohol.

Der käufliche (Äthyl)-Alkohol enthält 40—50 cm³ Wasser pro I
Die dem Physiker vielleicht am aussichtsreichsten erscheinende Metl
ihn dadurch zu trocknen, daß man ihn über metallischem Natrium st
läßt, ist nicht anwendbar, da sich Natriumalkoholat bilden wi
Der käufliche „absolute" Alkohol besitzt, je nachdem ob er mehr
weniger sorgfältig aufbewahrt worden war, 0,1—1,3% Wasser. E
sehr hygroskopisch und muß sorgfältig vor Luftzutritt geschützt wo

Trocknung durch Ätzkalk Ätzkalk (Calciumhydroxyd) :
aus der Luft Kohlensäure an und wird dadurch wirkungslos. Äl
Material glüht man daher vorsichtshalber in kleinen Portionen in ei
Schamottetiegel über der Gebläseflamme aus. — 1 l des zu reinige
Alkohols wird in eine Kochflasche gegossen und 50—100 g Ätz
dazugegeben. Auf die Flasche setzt man einen sogenannten „Rück
kühler": Der durch die Wirkung des Kühlwassers in diesem verdic
Alkoholdampf tropft wieder in die Flasche zurück. Die Flasche s
in einem halb mit Wasser gefüllten Topf, der durch Bunsenbre
geheizt wird. Man läßt den Alkohol mindestens eine Stunde lang sie
dann nimmt man den Kühler ab und destilliert hierauf den Alkoh
eine zweite Flasche über. Man erhält so 99,5—99,8 proz. Alkohol, d
Wiederholung des Verfahrens nahezu 100prozentigen.

Trocknung durch metallisches Calcium wird von WINKL
empfohlen. Man bereitet einen Apparat mit Rückflußkühler wie
vor, setzt dem Alkohol 20 g (trockene) Calciumdrehspäne pro Lit
und erwärmt, bis eine lebhafte Reaktion einsetzt. Man läßt den Alk
mehrere Stunden sieden und erhält nach dem Abdestillieren ein 99,9 I
Produkt. Diesem setzt man nun nochmals wenige Gramm Calciur
und wiederholt das Verfahren, wobei man jedoch vorsichtiger erhi
muß, da die Reaktion nun stürmischer erfolgt. Der das zweitemal
destillierte Alkohol ist in hohem Grade wasserfrei. — WINKLER
fernte vor der Trocknung das gleichfalls als regelmäßige Verunreini
anwesende Aldehyd durch Silberoxyd: 2—3 g Silbernitrat werde
10—20 cm³ Wasser gelöst und dann in ca. 50 cm³ 10proz. Natronl
gegossen. Der Niederschlag von Silberoxyd wird abfiltriert, mit W
gewaschen, getrocknet und mit Alkohol zerrieben. Dann bringt man
Silberoxyd sowie 1—2 g Ätznatron (oder Ätzkali) in 1 l des zu reiniger
Alkohols und läßt unter öfterem Umschütteln einige Tage stehen,
die Reaktion auf Aldehyd negativ ausfällt. „Reagens auf Aldeh
ist bei KAHLBAUM käuflich.

Die Trocknung durch Calciumäthylat ist von C. N. RIIBER, in der Zeitschr. f. Elektrochem. **29**, 334 1923 beschrieben. Nach RIIBER führen die drei angegebenen Reinigungsmethoden zu dem gleichen Wert für das spezifische Gewicht des absoluten Äthylalkohols, nämlich $d_{20/4} =$ 0,789334 (unter Annahme der Wasserdichte bei 20° = 0,998 232).

Prüfung auf Wasserfreiheit: Ätzbaryt löst sich mit gelber Farbe in absolutem Alkohol, Paraffinlösung erzeugt keine Trübung, wasserfreies, weißes Kupfersulfat färbt sich nicht. Das Kupfersulfat entwässert man, indem man es in einer Porzellanschale erwärmt und die Temperatur allmählich steigert, bis die blauen Kristalle zu einem rein weißen Pulver zerfallen sind.

Bernstein, Hartgummi und andere Isolatoren siehe Kap. VIII.

Picein, Siegellack und andere Kitte siehe Kap. III.

Gase siehe S. 396. (Füllung von Spektralröhren.)

Zweites Kapitel.

Löten, Schweißen und Kitten.

1. Das Weichlöten.

Als Lot dienen Blei-Zinn-Legierungen von wechselnder Zusammensetzung (von Zinn mit wenigen Prozent Blei bis zu Blei mit wenigen Prozent Zinn). Am häufigsten wird die eutektische Legierung 63 Sn + 37 Pb verwandt, Schmelzpunkt 181°; zum Löten von Zinn kann man die schon bei 140° schmelzende Legierung 3 Sn + 3 Pb + 3 Bi gebrauchen. Lote für besondere Fälle siehe S. 351.

Geeignetes „Lötzinn" ist in Metallwarengeschäften erhältlich. Es ist üblich, das in Stangen bezogene Lot zu schmelzen und über eine schräg gehaltene Flachfeile zu gießen, um dünne, schmale Streifchen zu erhalten.

Die zu lötende Stelle wird gereinigt (abgeschmirgelt, besser abgeschabt) und zur Verhinderung erneuter Oxydation mit einem reduzierenden „Flußmittel" bestrichen. Am wirksamsten ist „Lötwasser", das aus 60 Gewichtteilen Wasser, 30 Chlorzink und 15 Chlorammonium besteht. Sehr empfehlenswert sind auch verschiedene im Handel befindliche „Lötpasten", besonders „Fludor" (Hersteller: Classen & Co., Berlin-Niederschönhausen, Kaiserin-Augusta-Str. 5.) Alle Flußmittel greifen jedoch die Umgebung der Lötstelle im Laufe der Zeit durch Oxydation an und sollten daher nach erfolgter Lötung durch sorgfältiges Waschen mit kochendem Wasser, mindestens mit Spiritus entfernt

noch günstiger sind Kolophonium oder Paraffin, die aber lange r
so energisch reduzieren.

„Tinnol" (in Metallwarenhandlungen erhältlich), eine Paste
90 Gewichtsteilen Metallpulver von 50% Zinn und 50% Blei, 8
zerin und 3 Chlorammonium, ist für kleinere Lötungen (z B. von Ku
drähten) ausgezeichnet.

Um die Lötung auszuführen, werden die gereinigten und mit F
mittel bestrichenen Flächen der zu verlötenden Stücke zur Berüh
gebracht. Hierauf erhitzt man entweder mit der Flamme (Bunsenbre
oder Gebläselampe) und streicht gleichzeitig mit einem Lötzinnstreif
an der Lötstelle entlang, bis dieses schmilzt und das Lot in die I
fließt, oder man legt einige kleine Stückchen Lot in die Nähe der I
und verteilt das geschmolzene Metall mit einem steifen Messingdr
Oder man bedient sich zur lokalen Erhitzung des Lötkolbens. D
besteht aus einem Kupferbarren, der mit einem eisernen Stiel in ei
Holzheft befestigt ist. Der Kolben wird in der Flamme auf etwa
erhitzt. (Elektrisch geheizte Lötkolben fabriziert die „Benatu G.m.b.
Kiel, Holstenbrücke 8—10.) Man reduziert das Oxyd auf der Schneid
Kolbens (der „Lötbahn"), indem man sie auf einem Stück Salr
(Chlorammonium) reibt. Das Salz wird in der Hitze in Ammoniak
reduzierenden Chlorwasserstoff zerlegt. Hierauf berührt man die Schn
mit Lötzinn, das sofort schmilzt und adhäriert, und verzinnt sie d
weiteres Reiben auf dem Salmiakstück. Man fährt dann mit dem he
Kolben, der mit seinem Zinnvorrat ähnlich wie ein Pinsel wirkt, an
Lötfuge entlang. Der Kolben soll nie auf Rotglut erhitzt werden, da
dann das Zinn mit dem Kupfer legiert und an der Oberfläche eine ha
von der Feile schwer angreifbare Kruste bildet: „Der Kolben ist
brannt." Abhilfe: Den (heißen oder kalten) Kolben sorgfältig bl
feilen und neu verzinnen. — Zum Löten sehr kleiner Gegenstä
empfiehlt sich ein kleiner Kolben von Bleistiftform, womöglich
elektrischer Heizung, dessen Griff ein Glas- oder Porzellanrohr ist. I
Lötvorrichtung s. S. 353.

Die Festigkeit einer weich gelöteten Stelle ist naturgemäß nicht
zu groß. Sie besitzt ein Optimum, wenn die Lötung zwischen 250
350° ausgeführt wurde.

Schwer lötbare Metalle.

Aluminium. Eine frisch hergestellte Aluminiumoberfläche ü
zieht sich sehr schnell mit einer unsichtbar dünnen Haut von Al
und die oben angegebenen Flußmittel reichen nicht hin, diese Haut

Ein vom Bureau of Standards empfohlenes Weichlot besteht aus 84 Zinn, 9 Zink, 5 Aluminium und 2 Phosphor Schmelzpunkt ca. 240°. Geeignete Weichlote bringt z. B. die Metallochemische Fabrik Dr. Leopold Rostosky, Berlin NW 87, Kaiserin-Augusta-Allee 4, in den Handel unter der Bezeichnung „Firnit-Modellierlot N“ (niedriger Schmelzpunkt) und H (höherer Schmelzpunkt). Zur Ausführung der Lötung schabt man die Flächen blank, erhitzt das Arbeitsstück, bis ein Stückchen Lot auf der Arbeitsstelle schmilzt, und verreibt es (z. B. mit einem Drahtpinsel) sehr sorgfältig, bis es tadellos adhäriert. Ein Flußmittel wird also nicht verwendet. Allerdings ist die Festigkeit dieser Lötungen noch kleiner als die mit Zinnlot gelöteter anderer Metalle, außerdem wird die Lötstelle aus elektrochemischen Gründen von Elektrolyten, auch schon von Wasser und feuchter Luft angegriffen und bei längerer Einwirkung zerstört. — Es kann auf diese Weise Aluminium sowohl mit Aluminium als auch mit Messing, Kupfer usw. verlötet werden; Eisen soll man vorher verzinnen oder verkupfern. —

Über das viel haltbarere Hartlöten von Aluminium s. S. 352.

Magnesium und das magnesiumhaltige Elektrometall lassen sich überhaupt nicht weich löten.

Gußeisen, das sich nur schlecht verzinnt und lötet, soll man kräftig mit einer Messingdrahtbürste bearbeiten. Einige Mechaniker empfehlen, hier Stearin als Flußmittel zu verwenden.

Molybdän und Wolfram lassen sich nicht weich löten. Hartlöten von Wolfram s. S. 338.

Platin und Gold lassen sich gewissermaßen zu leicht löten, sie verbinden sich mit dem flüssigen Lötmetall sehr schnell zu einer grauen, brüchigen Legierung. Deshalb soll die Temperatur nicht höher und die Erhitzungsdauer nicht länger sein als unbedingt nötig. Man löte nicht in der Flamme, sondern mit einem kleinen Kolben.

Blei und Zinn schmelzen bei der Lötung leicht ab. Es empfiehlt sich daher das S. 349 angegebene Lot mit Wismutzusatz, eventuell Woodsches Metall (S. 342), doch ist die Festigkeit im letzteren Fall nur gering, da die niedrige Temperatur nicht zur kräftigen Desoxydation hinreicht. Als Flußmittel ist Fludor besonders geeignet. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit lötet man besser auf einer Asbestplatte über dem Bunsenbrenner. Bei Akkumulatorenbatterien werden die Verbindungen meist mittels des Knallgasgebläses verschmolzen.

Anlöten versilberter Quarzfäden siehe 6. Kapitel, 5.

2. Das Hartlöten.

Das Hart- oder Silberlot besteht in der Regel aus Kupfer-Zink-Silber-

Festigkeit und einen viel höheren Schmelzpunkt (600—900°) als Wei lot Man kann es herstellen durch Zusammenschmelzen von 78,3 Messi 17,4 Zink, 4,3 Silber; oder 36 Kupfer, 52 Zink, 12 Silber; oder 50 M sing, 50 Silber. Einfacher bezieht man es aus Metallwarenhandlun in Blechform und schneidet es in schmale, 1—2 mm breite Streifch Ist für besondere Zwecke (Thermoelemente) der Schmelzpunkt Hartlotes noch zu niedrig, so kann man reines Silber (961°) oder 24 kar ges Gold (etwa 1060°) benutzen. Ein Lot für Goldwaren besteht 54,5 Gold, 38,7 Silber, 6,8 Kupfer.

Als Flußmittel dient ein dünner Brei von Borax und Wasser. M streicht ihn auf die Lötfuge und erwärmt zunächst vorsichtig, bis nic nur das Wasser verdampft ist, sondern auch der Borax unter stark Aufblähen sein Kristallwasser abgegeben hat. Dann legt man eini sehr kleine Lotstückchen auf die Lötfuge und erhitzt weiter bis zu hol Rotglut. Der Borax schmilzt zu einem Metalloxyde vorzüglich lösend Glas und das sehr dünnflüssige, silberglänzende Lot wird durch kapill Kräfte weit in die Lötfuge hineingezogen. Diesen Vorgang kann m eventuell durch Reiben mit einem Eisendraht oder mit einem (schmelzenden) Streifen Lötmetall unterstützen. — Nach dem Erkalt entfernt man das Boraxglas durch vorsichtiges Hämmern oder dur Behandlung mit Salzsäure.

Eine Paste, die sich besonders zum Hartlöten von Eisen eignet u sich nach dem Erkalten leicht abwaschen läßt, liefert Hoffma München NW2, Bahnhofplatz 5, unter der Bezeichnung Löthart F.

Aluminium läßt sich nach den neuerdings entwickelten Verfahr fast so sicher und haltbar hartlöten wie Messing oder Kupfer. Das L besteht aus aluminiumreichen Legierungen (so daß die beim Weichlöt [S. 351] angeführten elektrochemischen Einwirkungen der Atmosphäril wegfallen), das Flußmittel enthält meist Lithiumchlorid. Empfehle wert sind die Lote der „Metallo-chemischen Fabrik Dr. Leopold R stosky", Berlin NW 87, Kaiserin-Augusta-Allee 4: „Firinit-Blechlo (für Drähte und Bleche) und „Firinit-Lotstäbe" (für Aluminiumgu mit dem zugehörigen „Firinit-Flußmittel". Die Lötung geschieht ga wie oben für Silberlot angegeben, nur ist die Differenz der Schme temperaturen von Lot und zu lötendem Metall hier geringer, wesha man vorsichtig sein muß, daß nicht letzteres schmilzt. — Die mechanisc Festigkeit der Lötstelle ist sehr zufriedenstellend. — Auch Kupfer, Messi und andere Metalle lassen sich so mit Aluminium verlöten. Eisen mu an der Lötstelle verzinnt, verzinkt oder verkupfert werden.

Wolfram kann, wie S. 338 erwähnt, mittels Neusilber und Borax m

3. Vorrichtungen zur Lötung sehr kleiner Gegenstände.

Streifchen von dünner Metallfolie, feine Drähte usw würden in der Flamme sofort verbrennen. Zur Ausführung solcher Lötungen empfehlen sich folgende Anordnungen:

a) Nach PRYTZ[1]) konzentriert man die Strahlen des positiven Kraters einer Bogenlampe auf die Lötstelle. Die Temperatur läßt sich mit einer Irisblende regulieren

b) Nach AUSTIN[2]) verschweißt man dünne Thermoelementdrähte an der Berührungsstelle (ohne Flußmittel) durch die Funken der Sekundärspule eines Induktors Es genügt hierfür ein ganz kleiner Induktor, der nur einige Millimeter Schlagweite hat, und die Schweißung ist momentan vollendet. AUSTIN sagt: „Der Kontakt wird weniger zerbrechlich sein, wenn die Schweißung in einer sauerstofffreien Atmosphäre vorgenommen wird."

c) F. MEYER[3]) hat eine sehr praktische Anordnung angegeben, die in Fig. 7 abgebildet ist. M ist die Membran eines Kohlemikrophones, die in der Platte eines (niedrigen, kräftigen) Tischchens befestigt ist und die in der Mitte von einer fein zugespitzten Bogenlampenkohle berührt wird. Leitet man den Strom der Lichtleitung unter Vorschaltung eines Stromschlüssels und eines Widerstandes (50—100 Ohm) von der Membran (+) zur Kohle (—), so entsteht auf der Oberseite der Membran ein glühender Fleck von wenigen (2—3) mm Durchmesser, dessen Lage auch nach dem Erkalten an der helleren Färbung zu erkennen ist. Man richtet die Drähtchen usw. zunächst auf der Membran so aus, daß die Lötstelle gerade auf dem hellen Fleck liegt, bringt eine Spur Lot und Flußmittel auf, deckt eventuell mit einem Quarz- oder Glimmerstück ab und führt dann die Lötung durch Schluß des Stromes aus. Diese Vorrichtung eignet sich sehr gut zum Weich- und zum Hartlöten, nur muß man Sorge tragen, daß nicht der geschmolzene Borax an der Membran festklebt.

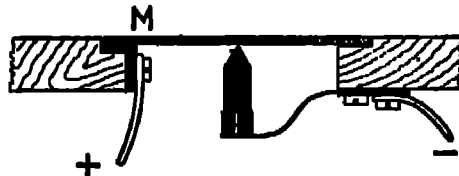



Fig. 7. Lötvorrichtung.

d) A. H. PFUND[4]) benutzt zum Weichlöten seiner Thermoelementlegierungen ein Glasstreifchen als Lötkolben. Die Methode, zu der er „nach vielen vergeblichen Versuchen" kam, ist unten im 8. Kapitel (2.) beschrieben.

---

1) E. S. JOHANSEN, Ann. Phys. 33, 532. 1910.
2) L. W. AUSTIN, Phys. ZS. 12, 1226. 1911.
3) F. MEYER, ZS. f. Fernmeldetechnik 1, 13. 1920.

4. Schweißen.

Unter „Schweißung" versteht man die Vereinigung zweier h erhitzter erweichter Metallstücke ohne Bindemittel dadurch, daß ihre Oberflächen durch Pressen oder Hämmern in innige Berühı bringt (Bei der eigentlich nicht hierhergehörigen Lichtbogen- und „autogenen Schweißung" werden die Berührungsflächen durch die F des Lichtbogens bzw der Acetylen-Sauerstoffflamme verschmol Nur bei verhältnismäßig wenigen Metallen wird die Schweißung prak angewandt; besonders bei Eisen und Platin. Nicht schweißen lassen z. B. Messing, Aluminium, Zink.

Für den Physiker ist besonders das Schweißen von Platin von deutung. Da es sich im Laboratorium immer darum handeln Platinstücke von geringer Masse zu schweißen, ist es nicht ganz lo die Abkühlung zwischen der Erhitzung in der Flamme und dem einigenden Hammerschlag zu vermeiden. Man stellt einen klc Amboß so neben die Gebläseflamme, daß sie tangential über seine Fl streift. Wenn möglich, befestigt man die beiden Platinstücke zun provisorisch aneinander, zwei Drähte z. B., indem man sie verd Blech und Draht, indem man den Draht durch zwei Löcher in dem F steckt. Dann erhitzt man die zu schweißende Stelle zur Weißglut führt durch die Flamme hindurch einen leichten Schlag mit ei kleinen Hammer aus. Ist die provisorische Befestigung der Stücke ı angängig, so baut man sie auf einigen Tonstückchen in richtiger ge seitiger Lage auf der Fläche des Ambosses auf. Wenn die Stücke etwas aneinanderhaften, ist es leicht, die Stelle durch mehrma Glühen und Hämmern sauber zu bearbeiten.

Ähnlich kann man Kupfer und Platin verschweißen, vorteilhaft u Verwendung von etwas Borax auf dem Kupfer. So pflegt man d Vakuumröhren eingeschmolzenen kurzen Platindrahtstücke durch geschweißten Kupferdraht oder Kupferlitze zu verlängern. Hai es sich um Drähte über 0,8 mm, so verbindet man sie besser über e Vorschaltwiderstand mit der Lichtleitung, erzeugt zwischen den Er einen Augenblick lang einen Lichtbogen (2—3 Amp.) und stößt sie sc zusammen.

5. Reversible Kitte: Harzkitte, die bei Erwärmung erweichen.

Von der sehr großen Zahl der in der Technik bekannten Kitte[5]) hı zwar nur einige wenige Sorten in der Werkstatt des Physikers Eing gefunden, diese sind ihm jedoch beim experimentellen Arbeiten

[5]) Vgl. A. Breuer, „Kitte und Klebestoffe". Hannover, M. Jaenecke, 1 S. Lehner, Kitte und Klebemittel Wien und Leipzig; A. Hartleben's V

entbehrlich geworden. Im folgenden sind die wichtigsten Kitte ungefähr nach steigendem Schmelzpunkt geordnet

a) Klebwachs wird schon durch die Handwärme plastisch und dient besonders zum vorübergehenden Anheften leichter Gegenstände. Man kann es selbst herstellen durch Mischung von 95 Teilen Wachs mit 5 Teilen venezianischen Terpentins; eine Zugabe von etwas Maschinenöl läßt es noch weicher werden. Sehr brauchbares Klebwachs (rotgefärbte Stangen) kann von Desaga, Heidelberg, bezogen werden.

b) Wachs-Kolophoniumkitt. Dieser viel gebrauchte Kitt nimmt insofern eine Sonderstellung ein, als er beim Erwärmen nicht eigentlich plastisch, sondern gleich flüssig wird. Sein Schmelzpunkt liegt bei etwa 55°, sein Erstarrungspunkt bei etwa 47°. Er eignet sich besonders zum Befestigen größerer Holz- und Metallklötze, der Glas-, Porzellan- oder Hartgummiteile einer Versuchsanordnung u. a. Von Wasser und Alkohol wird er nicht wesentlich angegriffen. — Man bereitet ihn durch Zusammenschmelzen von gleichen Gewichtsteilen von Kolophonium und gelbem Bienenwachs und trägt ihn flüssig mit einem Pinsel auf oder mit einem Löffel, in dem der Kitt fast bis zum Sieden erhitzt wird. Auf kleinen Kittstellen schmilzt man ihn mit einem Lötkolben oder einem anderen geeigneten Metallstück (Schraubenzieher) oder — sehr empfehlenswert — mit einem wenige Millimeter langen, aus der fein ausgezogenen Spitze eines Glasrohres mit langem Schlauch brennenden Flämmchen („Lenardsches Flämmchen").

c) Marineleim. Dieser Kitt war früher für Hochvakuumarbeiten sehr beliebt, ist aber auf diesem Gebiet von den weiter unten beschriebenen Kitten wohl vollständig verdrängt worden. Er haftet auf Glas und Metall vorzüglich und dichtet daher sehr gut, eignet sich z. B. zum Abdichten von Hochdruckleitungen. Von Säuren, Alkalien, Chlor usw. wird er nur wenig, von Alkohol stark angegriffen. Marineleim ist eine harte, schwarze Masse von glasartigem Bruch, er ist jedoch bei Zimmertemperatur stärker plastisch als Siegellack: Wenn man z. B. den verkorkten Tubus einer Wulffschen Flasche durch aufgegossenen Marineleim gedichtet hat, so bilden sich bei wochenlang wirkendem inneren Überdruck Blasen. Beim Erwärmen riecht Marineleim nach Karbol; bei etwa 30—35° wird er elastisch, ähnlich wie weicher Gummi, bei 35 bis 45° schmilzt er (und brennt bei Berührung mit der Flamme sehr leicht). Marineleim löst sich in Benzin, Benzol und Terpentinöl.

d) Picein. Einer der beliebtesten Kitte ist das von der Hamburger Gummiwaren-Kompagnie hergestellte, von WALTER[4]) empfohlene Picein Es klebt stärker als Siegellack und wird auch bei etwas niedrigeren Tem-

peraturen plastischer als dieser. Bei 70—80° wird es flüssig. Picein von tiefschwarzer Farbe, es wird von Wasser nicht, von Alkohol n tagelangem Verweilen spurenweise, von Benzin, Benzol und Terpent leicht und vollständig gelöst Es isoliert sehr gut und ist auch für H vakuumdichtungen vorzüglich geeignet. Mit wasserfreiem Lan (Adeps lanae) läßt sich Picein in jedem Verhältnis zusammenschmel wodurch Härte und Schmelzpunkt beliebig herabgesetzt werden kön Bezugsquelle: z. B. Firma Lautenschläger (G. m. b. H.), Münch Lindwurmstr. 29—31.

e) Siegellack. B WALTER[7]) schreibt· „Die Bedeutung des Sie lackes für die Zusammensetzung provisorischer physikalischer Appa ist schon beinahe sprichwörtlich geworden." Besonders empfehlensw sind die von der Firma J. G R Lilliendahl, Neudietendorf in Thürin hergestellten weißen „Kittlacke". Eine gute Mittelqualität ist Nr. ' Preis: 0,5 kg 4,80 M. Die besten Qualitäten sind die Nr. 220 und 1 Preis. 0,5 kg ca. 6 M.[8]) Das wichtigste Anwendungsgebiet dieses Ki sind Hochvakuumdichtungen. Während der gewöhnliche, rote Sie lack nach dem Erkalten in der Regel feinste Risse bekommt, die Erreichung eines hohen Vakuums verhindern, sind richtig hergest (s. unten) Kittungen mit den angegebenen Sorten geradezu absolut di Der Dampfdruck der weißen Kittlacke ist sehr niedrig. — Sie sind Zimmertemperatur etwas plastisch (eine nur an den Enden unterstüt Stange biegt sich allmählich durch), erweichen bei ca. 70° und sind ca. 100° flüssig. Ein Lösungsmittel für Siegellack ist Alkohol.

f) Khotinsky-Cement ist ein in vielen ausländischen Arbeiten wähnter amerikanischer Harzkitt. Er kommt in drei Qualitäten — we mittel, hart — in Handel, ist braun bis schwarz gefärbt und ähnelt Aussehen dem Schellack oder Marineleim. Beim Erwärmen verbreite einen starken, karbolähnlichen Geruch, und deshalb ist zu vermut daß sein Dampfdruck nicht sehr niedrig sein dürfte. Auf Glas und Me haftet er sehr fest. Der Kitt wird bei 50° weich, bei 60—80° flüs

Das Kitten. Zur Ausführung einer haltbaren und eventuell vaku dichten Kittung genügt es nicht, nur den Kitt allein zu erwärm sondern es ist erforderlich, daß auch die beiden zu verbindenden T bis über den Schmelzpunkt des Kittes erhitzt sind. Man erwärmt da die letzteren zuerst — entweder im Bunsenbrenner, oder mit dem Ha gebläse (S. 365), oder mit dem „Lenardschen Flämmchen". Dann verflüssigt man die Spitze einer Kittstange durch vorsichtiges Drel

[7]) B. WALTER, Ann. Phys. 18. 860. 1905.

über der Flamme und trägt Sorge, daß der Kitt nicht zu brennen anfängt. Hierauf bestreicht man die beiden Flächen, preßt sie zusammen und läßt erkalten. Einer zu kittenden Vakuumleitung gibt man zweckmäßig die Form Fig. 8a oder b. Der kleine Becher wird erhitzt, und dann läßt man von einer Stelle aus so viel Kitt einlaufen, bis er sich gefüllt hat. Hat man weite Schliffe anzuwärmen, so legt man sie auf eine mit Asbestpappe bedeckte Metallplatte und erwärmt diese durch einen untergestellten Bunsenbrenner. Ob man Picein oder weißen Siegellack bevorzugt, scheint dem persönlichen Geschmack überlassen zu bleiben.

Der Temperatur der flüssigen Luft halten die genannten Kitte nicht stand: sie springen mit lautem Klirren ab.

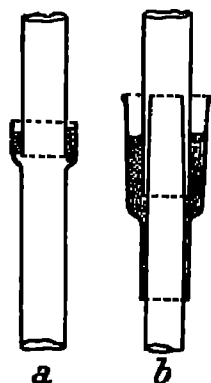
Fig. 8. Vakuumkittung.

g) Silberchlorid ist ein nach HULBURT[9]) auch für Vakuumarbeiten geeigneter Kitt, der erst bei 455° schmilzt. Das geschmolzene Salz erstarrt zu einer hornartigen, an Glas, Quarz und Metall festhaftenden Masse. Chlorsilber ist unlöslich in Wasser, Alkohol, Benzol und anderen Kohlenwasserstoffen und wird auch von Säuren nicht angegriffen; von „Fixiernatron“, Natriumthiosulfat, wird es allmählich gelöst. Im Gegensatz zu dem frisch gefällten verändert sich das geschmolzene und wieder erstarrte Salz im Licht kaum merklich. Es empfiehlt sich, das Salz erst in einem Porzellantiegel zu schmelzen, kleine Stückchen der erstarrten Schmelze neben die Kittstelle zu legen, mit der Flamme zu erhitzen und das geschmolzene Salz mit einem Draht zu verteilen. — Wegen der hohen Temperatur ist die Gefahr des Springens beim Anwärmen und auch nach dem Erkalten natürlich größer als etwa bei Siegellack oder Picein. Dieser Kitt, über den anscheinend noch wenig Erfahrungen vorliegen, dürfte sich besonders zum Aufkitten von Quarzfenstern auf Glas-Quecksilberlampen eignen.

Gleichfalls für besondere Fälle kommen in Betracht:

h) Metallkitt von RAWSON[10]) ist eine Legierung von 40 Wismut, 25 Blei, 15 Quecksilber, 10 Zinn und 10 Cadmium. Diese Legierung schmilzt leicht, haftet gut an Metall und Glas, besonders wenn es vorher versilbert oder verplatiniert wurde, und eignet sich z. B. zum Einkitten von Elektroden in ein Schwefelkohlenstoffrohr zur Untersuchung des Kerreffektes.

---

[9]) E. O. HULBURT, Science 56, 147. 1922; OSTWALD-LUTHER, „Handbuch zur Ausführung physiko-chemischer Messungen“, Leipzig, Akademische Verlagsges. m. b. H. 4. Aufl. 1925.

i) „Rollermasse“ ist eine in Reproduktionsanstalten gebrauchte, elastische Gallertmasse, die bei ca. 90° schmilzt, nach dem Erstarren bei Zimmertemperatur jedoch plastisch bleibt und deshalb besonders zum vollkommen spannungsfreien Aufkitten von Fenstern bei Polarisationsversuchen geeignet ist. Sie ist löslich in Wasser, unlöslich in Alkohol, Öl, Äther und Schwefelkohlenstoff[11]).

Eine ähnliche Masse stellt man her, indem man 20 g Tischlerleim in 75 g heißen Wassers auflöst und dann 100 ccm Glycerin zusetzt.

k) Verrühren von vorsichtig geschmolzenem Schellack mit ca. 10% Cassia- oder Olivenöl gibt nach Ostwald-Luther (l. c.) einen langsam erstarrenden, sehr zähen Kitt.

Emaille als Kitt s. S 366.

6. Klebemittel.

Für den Bedarf des Physikers dürften besonders die folgenden Klebestoffe in Betracht kommen

a) Die bekannte Paragummilösung, die nach dem Verdunsten des Lösungsmittels eine Gummihaut hinterläßt. Durch Bepinseln mit Schwefelchlorür (S_2Cl_2, entwickelt stark reizende Dämpfe!) kann der Gummi vulkanisiert und dadurch haltbarer gemacht werden.

b) Eine dickflüssige Lösung von Zelluloidschnitzeln in Azeton. Sie ist natürlich in erster Linie zum Verkleben von Zelluloid geeignet, kittet aber auch Porzellan und anderes Material. Der Zelluloidüberzug haftet sehr fest, besonders wenn man die Flächen mit Aceton abgerieben hat

c) Eine starke Lösung von Blätterschellack in absolutem Alkohol oder in Azeton. Sie eignet sich besonders zum Dichten feiner Poren bei Vakuumarbeiten, auch zum Ankitten von Quarzfäden u. a., ferner zur Verbesserung der durch Oberflächenleitfähigkeit bedingten mangelhaften Isolation von Glas- und Hartgummistützen. Für den letzteren Zweck soll der Alkohol so trocken wie irgend möglich sein.

d) Bakelit, ein Kondensationsprodukt aus Karbolsäure und Formaldehyd, kommt in drei Modifikationen: A, B und C vor. A ist entweder eine zähe braune Flüssigkeit von karbolähnlichem Geruch oder ein kolophoniumähnliches Harz, das bei höherer Temperatur schmilzt. Durch längeres Erwärmen geht die Modifikation A in B und zuletzt in C über, und zwar bei einigen Qualitäten unter Gasentwickelung (die durch äußeren Überdruck während des Erwärmens verhindert wird). B ist in der Wärme gummiartig-plastisch, C dagegen unschmelzbar, bis es bei einer Temperatursteigerung auf über 300° verkohlt. Das Bakelit C ist

von hoher Widerstandsfähigkeit gegen heißes Wasser, verdünnte Säuren und Alkalien, außerdem ein guter Isolator. Man kann also z. B. Holz, Metall, Papier, Drahtwicklungen usw. mit flüssigem Bakelit A bestreichen oder eventuell imprägnieren und erhält nach dem Erwärmen Oberflächenschichten von hoher Widerstandsfähigkeit gegen erhöhte Temperatur und Chemikalien.

Bezugsquelle. Bakelit-Gesellschaft m. b. H., Berlin W 35, Lützowstraße 32.

7. Irreversible Kitte.

Unter dieser Bezeichnung wollen wir Kitte verstehen, die kurz vor dem Gebrauch hergestellt, etwa aus zwei Komponenten gemischt werden und nach kurzer Zeit für immer erstarren, im Gegensatz zu den oben besprochenen Harzkitten, die beliebig oft durch Erwärmen verflüssigt werden können. Vor diesen zeichnen sie sich im allgemeinen durch ihre Beständigkeit bei höheren Temperaturen und gegen Chemikalien sowie durch größere mechanische Festigkeit aus. Für Vakuumdichtungen sind sie wenig geeignet, teils weil sie lange Zeit Wasserdampf abgeben, teils wegen ihrer Porosität, die durch einen Schellacküberzug behoben werden muß.

a) Glycerin - Bleiglätte. Für Metall, Glas, Porzellan, Holz. Der Kitt verträgt Temperaturen bis 270° und wird von Wasser, Säuren und Alkalien kaum merklich angegriffen. Bleiglätte (Bleioxyd) wird auf einem Eisenblech einige Minuten auf 200—400° erhitzt (zur Vertreibung der Kohlensäure) und nach dem Erkalten mit dickflüssigem Glycerin zu einem Brei angerührt. (Auf 4 g Bleioxyd etwa 1 ccm Glycerin.) Die zu kittenden Flächen werden zuerst mit Glycerin bestrichen. Der Kitt ist in etwa $^1/_4$ Stunde erstarrt.

b) Wasserglaskitte. Dickflüssiges Natronwasserglas gibt mit Gips, Kreide, Kalk, Zinkoxyd, Talkum harte, an Metall, Glas, Porzellan, Stein gut adhärierende Kitte. Wasserglas-Talkum ist besonders temperaturbeständig, es hält dauernd Temperaturen von 600—800° aus; andererseits haftet der Kitt auch bei Abkühlung mit flüssiger Luft. In dicker Schicht braucht er mehrere Stunden zum Erstarren. Von Wasser wird der Kitt angegriffen und allmählich zerstört.

Asbestpappe,- flocken, -schnüre werden nach der Tränkung mit Wasserglas oder einem dünnen Brei von Wasserglas und Talkum sehr schmiegsam, nach dem Erstarren steif und hart. Wasserglas ist ein temperaturbeständiger Leim für Asbest.

c) Zinkoxychlorid - Kitt. Dieser Kitt erstarrt in wenigen Minuten und übertrifft die vorhergenannten durch seine Härte. Es lassen

sich z. B kleine Gegenstände aus ihm formen, die sogar nachträglich poliert werden können. Man stellt ihn durch Mischen einer ca 60proz. Chlorzinklösung mit fein gepulvertem karbonatfreien Zinkoxyd (Kahlbaum) her. — Das Zinkoxyd zieht allmählich Kohlensäure aus der Luft an und muß daher unter Luftabschluß aufbewahrt werden. Technisches Zinkoxyd (Zinkweiß) wird vor der Verwendung mit 2proz. Salpetersäure zu einem Brei verrührt, nach dem Trocknen in einem hessischen Tiegel zur hellen Rotglut erhitzt, dann gepulvert und am sichersten in abgeschmolzenen Röhrchen aufbewahrt

Ähnlich gute Eigenschaften haben die in der Zahntechnik gebräuchlichen Mischungen aus Zinkoxyd und Phosphorsäure. Die Chemikalien sind bei Kahlbaum erhältlich („für zahntechnische Zwecke").

d) Hohe Temperaturen (bis 1600°) hält eine Mischung von Kaolin mit 10% Borax aus, die man mit Wasser oder mit Leinölfirnis zu einem steifen Brei verrührt, auf der Kittstelle eintrocknen läßt und dann langsam bis auf helle Glut erhitzt[12]).

e) Als „Gelatinekitt" kann man heißen, dicken Tischlerleim bezeichnen, der nicht nur an Holz, sondern auch an Hartgummi, aufgerauhtem Metall usw. vorzüglich adhäriert. Seine spätere Löslichkeit in warmem Wasser kann man beseitigen, wenn man einige Prozente gesättigter Kaliumbichromatlösung hinzufügt und die (getrocknete) Kittstelle einige Zeit dem Tageslicht aussetzt.

Gips haftet besser, wenn man ihn nicht mit Wasser, sondern mit dünner Leimlösung anrührt.

Drittes Kapitel.

Die Bearbeitung von Glas.

1. Glasblasen.

Einige Fertigkeit in der Kunst des Glasblasens, die ihn von der handswerksmäßigen Arbeit des Glasbläsers unabhängig macht, wird dem Physiker viel Zeit und Enttäuschung ersparen. In dem Rahmen dieser Abhandlung lassen sich die verschiedenen Handgriffe und Methoden nicht beschreiben und lehren; es sei jedoch auf die einschlägigen Kapitel in den Büchern von Arendt[1]) und Wehnelt[2]) sowie auf das bekannte Büchlein von Ebert[3]) verwiesen, endlich auf das kürzlich erschienene

[12]) Nach Ostwald-Luther l. c., S. 357, Fußnote 9.

[1]) R. Arendt, Technik der anorganischen Experimentalchemie. Hamburg, Leop. Voss, 1910.

[2]) A. Wehnelt, Handfertigkeitspraktikum, l. c., Fußnote S. 335.

[3]) H. Ebert, Anleitung

„Lehrbuch der Glasbläserei" von WOYTACEK[4]). Das letztere bringt zwar die herkömmliche Technik des Glasbläsers sehr ausführlich und durch viele Abbildungen unterstützt, man vermißt jedoch z. B. die modernen Einschmelzverfahren für Kupfer, Nickelstahl, Molybdän, die Verarbeitung von Quarzglas, Pyrexglas u. a.

Wir setzen im folgenden voraus, daß der Leser mindestens Gelegenheit hatte, einen Glasbläser bei der Arbeit zu beobachten, und heben nur die Punkte hervor, die erfahrungsgemäß vom Anfänger häufig nicht beachtet werden.

a) Das Werkzeug des Glasbläsers. Glasblasetisch und Stuhl sollen so hoch sein, daß man bei der Arbeit an der Lampe die Ellbogen aufstützen kann, und der Tisch muß an einem nicht zu stark beleuchteten und zugfreien Platz stehen. Die sogenannten „Wassertrommelgebläse", bei denen die von einer Wasserstrahlpumpe mitgerissene Luft in einer Wulffschen Flasche komprimiert wird, sind zwar sehr bequem, die Luftmenge reicht jedoch häufig nur für kleine Flammen aus. Braucht man (vorübergehend) viel Luft, so läuft manchmal die Wulffsche Flasche voll, und das Wasser spritzt durch die Flamme. Man muß daher beim Arbeiten die Flasche etwas im Auge behalten. — Über Handgebläse siehe S. 365.

Zum Abtrennen der Röhren benötigt man ein „Glasmesser" aus hartem Stahl, das von Zeit zu Zeit nachgeschliffen werden muß; ferner mehrere Eisendrähte von 3—4 mm Dicke, die an beiden Enden zu Halbkreisen von verschiedenen Durchmessern gebogen sind. Für verschiedene Zwecke erwünscht sind einige lanzettähnlich geschnittene Streifen aus 0,5—1 mm starkem Schwarzblech mit abgerundeten Kanten, eine kräftige Pinzette, endlich eine Handvoll Korke verschiedener Durchmesser.

b) Das Abtrennen von Glasröhren. Je nach dem Durchmesser wendet man drei Methoden an: Alle Röhren werden zunächst geritzt, indem man das Glasmesser fest andrückt und das Rohr langsam dreht (nicht, indem man mit dem Messer auf dem Rohr hin und her sägt). Röhren bis zu 8 mm Außendurchmesser („Biegeröhren") lassen sich dann durch ziehendes Biegen an der geritzten Stelle glatt abbrechen. Ist dies nicht möglich, weil die beiden Enden des Rohres fixiert sind (Glasapparatur) oder weil das abzubrechende Ende nur einige Zentimeter lang ist, so erzeugt man an der geritzten Stelle einen Sprung. Man zieht ein Glasstäbchen von ca. 1 mm Dicke und 1—3 cm Länge aus, richtet eine kleine, scharfe Stichflamme her, hält das abzusprengende Glasrohr dicht unter die Flamme, schmilzt die Spitze des Glasstäbchens zu einem

sehr kleinen, sehr heißen (hell glühenden) Tröpfchen und drückt diese möglichst schnell genau auf die angeritzte Stelle. (Zweite Methode besonders auch für Röhren von 1—2 cm Durchmesser geeignet.) Es erfordert einige Geschicklichkeit, den Tropfen noch glühend auf den Ritz zu bringen. Ist der Tropfen größer als 2—3 mm, so folgt der Sprung nicht mehr dem Ritz. Das Rohr kann an der Sprungstelle leicht abgebrochen werden. — Dritte, sicherste Methode; besonders für Rohre über 2 cm. Das Rohr wird rund herumgeritzt (was sonst erwünscht, aber nicht notwendig ist). Man nimmt einen der gebogenen Eisendrähte, der das Rohr möglichst auf dem ganzen Halbkreis berührt, erhitzt ihn zum hellen Glühen, drückt ihn auf den Ritz und dreht das Rohr langsam um seine Achse. Nach einiger Zeit (10 Sekunden), wenn der Draht schon nicht mehr glüht, springt das Rohr unter dem Ritz. Für die weitesten Rohre verwendet man statt des Eisendrahtes vorteilhaft einen (dünnen) elektrisch geglühten Nickel-, Chromnickel- oder Platindraht.

c) Einige Ratschläge für das Glasblasen. Jedes Glasrohr über 6 mm Durchmesser muß vorsichtig angewärmt werden, ehe es die Gebläseflamme verträgt. Besonders leicht springen natürlich komplizierte, früher geblasene Stücke. Diese bringt man zuerst, unter ständigem Drehen (!) einige Zentimeter über die Spitze eines kleinen Flämmchens (ohne Gebläseluft), nach einigen Minuten in die Basis der großen Flamme, so daß es ganz von dieser umspült wird, dann in den oberen Teil derselben, hierauf öffnet man allmählich die Luftzufuhr und dreht das Stück dauernd langsam weiter, bis es anfängt zu erweichen und die Flamme gelb zu färben. Erst dann darf man mit der scharfen Flamme eine eng begrenzte Stelle bearbeiten. Vor dem Anwärmen überzeuge man sich, daß alle Öffnungen außer der zum Hineinblasen dienenden geschlossen sind. Zum Aufblasen nimmt man das Rohr aus der Flamme. — Die Verschmelzung erfolgt sicherer und schneller, wenn das Glas sehr weich ist. Es schadet nicht, wenn es dabei stark zusammensinkt, weil die Verengung doch wieder herausgeblasen wird. Besonders weitere Rohre soll man mit der vollen Kraft des Gebläses bearbeiten. — Man achte darauf, daß die Wandstärke während des Arbeitens weder durch unbewußtes Stauchen größer, noch durch unbewußtes Ziehen allmählich kleiner wird als die des unbearbeiteten Rohres. Verdickungen müssen herausgeblasen werden, auch wenn die Schönheit des Stückes darunter leidet, weil sie nach dem Erkalten Anlaß zu unregelmäßigen Spannungen geben. — Das Biegen enger Röhren erfolgt auf dem sogenannten „Fischschwanzbrenner" mit breiter, flacher Flamme und ist sehr leicht; weite Röhren vor der Gebläselampe so zu biegen, daß sie überall gleich weit bleiben, überläßt der Anfänger dagegen besser dem

muß dazu auf eine ziemlich große Strecke gut und sehr gleichmäßig erweicht und während des Biegens aufgeblasen werden.

Zwischenstücke zur Verbindung von gewöhnlichem mit schwer schmelzbarem Glas, selbst mit Quarzglas, liefert Schott & Gen., Jena.

Das gasdichte Einschmelzen eines Stückchens Platindraht in ein Rohr ist recht einfach: Man heftet ihn in der Flamme vorübergehend an die Spitze eines Glasröhrchens oder -stäbchens, um ihn halten zu können, erweicht die Spitze eines Stäbchens „Einschmelzglas" und überzieht den Draht etwa 5 mm weit mit dem Glas, indem man ihn um seine Achse dreht. Der aufgewickelte dicke Glasfaden wird dann zu einem Zylinder

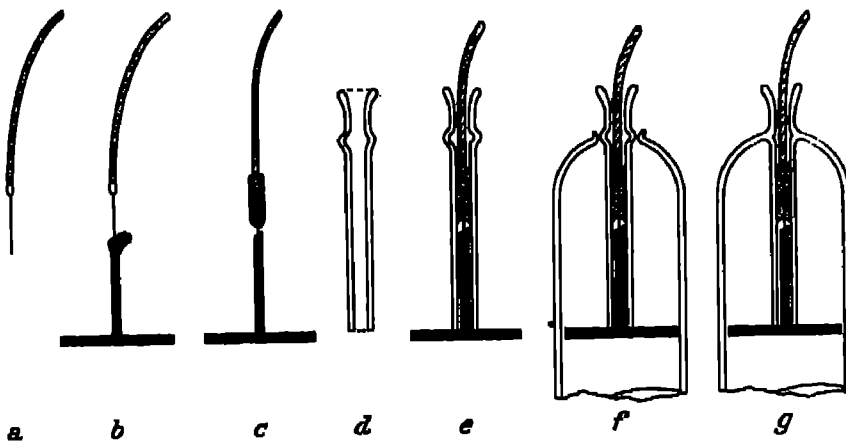



Fig. 9. Einschmelzen von Elektroden

zusammengeschmolzen, und zwar in der äußersten, oxydierenden Spitze einer kleinen, mit viel Luft versetzten Flamme. In der Reduktionsflamme wird das Glas oberflächlich reduziert, es wird schwarz, metallglänzend, klärt sich aber sofort wieder in der oxydierenden Zone der Flamme. Nun macht man eine enge Öffnung in das Rohr, in das der Draht eingeschmolzen werden soll, so daß das Zylinderchen eben hineinpaßt, und verbläst ihn, eventuell mit noch etwas Einschmelzglas nachhelfend. Besser wird die erwähnte Öffnung zunächst mit einem dicken Tropfen Einschmelzglas verschlossen, durch mehrmaliges starkes Erhitzen und Wiederaufblasen eine innige Verbindung des Geräteglases mit dem Einschmelzglas erzielt, und erst dann bläst man in das Einschmelzglas ein Loch und schmilzt das Zylinderchen ein.

Die Herstellung von Aluminiumelektroden für Entladungsröhren ist in Fig. 9 veranschaulicht. a stellt ein Stück Kupferdrahtlitze dar, in deren unteres Ende ein Platindraht eingeschmolzen ist (S. 364). In b ist

in der Mitte — an dem Platindraht befestigt. Man erhitzt dazu d[en] Aluminiumstift in der Gebläseflamme bis nahe an den Schmelzpunk[t,] macht gleichzeitig den Platindraht hellglühend und stößt ihn einig[e] Millimeter weit in das erweichte Aluminium hinein. Meist bildet d[as] Aluminium dabei einen Tropfen, wie gezeichnet. Dieser wird weg[-] gefeilt, hierauf der Draht und ein Stück der Litze mit Einschmelzgla[s] umgeben: c. Dann richtet man das Röhrchen von der in d gezeichnete[n] Form her, das sich gerade über den Zylinder aus Einschmelzglas schiebe[n] läßt, erhitzt den das Einschmelzglas umgebenden Teil und verschmilz[t] ihn. e. In f ist die Elektrode in das Entladungsrohr, das oben ein Loch vo[n] passender Größe erhalten hat, eingeführt, in g ist der Rand dieses Loche[s] mit dem Elektrodenröhrchen verblasen und die Elektrode fertiggestellt.

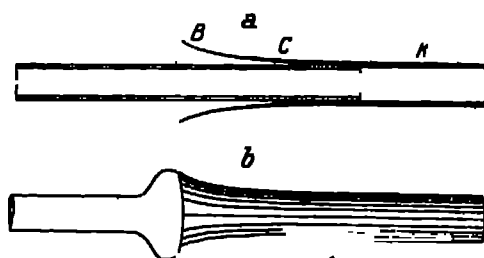



Fig. 10. Verschmelzung von Glas mit Kupferrohr.

Bis vor wenigen Jahre[n] war man auf Platin als au[f] das einzige Metall, das sic[h] vakuumdicht einschmelze[n] ließ, angewiesen. Neuerding[s] stellt besonders die Vakuum[-] schmelze W. C. Heraeus, Ha[-] nau am Main, Nickelstahl[-] draht her, der auch von weni[-] ger Geübten fast so leicht eingeschmolzen werden kann wie Platin. Man darf ihn nur nicht zu lange der Flamme aussetzen, da er sich beim Glühen oxydiert.

Wenn man einen Streifen dünnes (0,1 mm) Kupferblech um ein Glasrohr herumlegt und mit der Gebläseflamme bearbeitet, so löst das erweichte Glas das gebildete Kupferoxyd und adhäriert nach dem Erkalten an dem Metall (wenn auch nicht so gut wie Platin). Man kann daher Kupfer- und Glasrohre verschmelzen, nur muß das Kupfer, das sich beim Erkalten stärker zusammenzieht als das Glas, außen sein, und seine Wand muß so dünn gemacht werden, daß es das Glas bei der Abkühlung nicht zerquetscht, sondern sich etwas streckt. Housekeeper[8]) gibt u. a. folgende zwei Methoden zur Herstellung vakuumdichter Verschmelzung von Kupfer mit Glas an: 1. Man sprengt ein Glasrohr ab, klemmt ein dünnes Kupferblech zwischen die Schnittflächen und schmilzt es in der Gebläseflamme fest. Nachträglich kann man das Rohr dicht an der Einschmelzstelle absprengen und den stehengebliebenen Glasring auf dem Blech niederschmelzen, ferner (als Elek-

[8]) W. G. Housekeeper, Journ. Amer. Inst. Electr. Eng. 42., 954. 1923. Vgl.

trode) ein dickes Drahtstück in eine zentrale Bohrung des Bleches einlöten. — 2 Ein Kupferrohr K (Fig. 10 a) wird ausgedreht wie gezeichnet und am Ende posaunenförmig ausgeweitet, dann seine Wand zwischen B und C, z. B. durch Abätzen mit Salpetersäure, möglichst dünn gemacht. In das ausgedrehte Lumen führt man ein Glasrohr ein, verschmilzt erst bei C, dann, unter Aufblasen des Rohres bei B und kühlt zuletzt sorgfältig Fig. 10 b zeigt das Aussehen des fertigen Stückes. So ließen sich Rohre bis zu 9 cm Durchmesser für mächtige Quecksilberdampf-Gleichrichter aufschmelzen. Mittels eines an beiden Enden aufgeweiteten Kupferrohres kann man auch eine Verbindung zwischen Geräteglas und schwer schmelzbarem Glas herstellen.

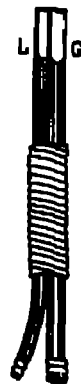
Bei Röntgenröhren werden bekanntlich neuerdings häufig die Elektroden als Kupferrohre eingeschmolzen (eventuell unter Verwendung eines besonderen Einschmelzglases, das z. B. Gundelach in Gehlberg (Thüringen) herstellt. Ein früheres Patent der A. E. G., Molybdändraht unter Zuhilfenahme von Molybdänglas einzuschmelzen, dürfte damit überholt sein.

Fig. 11. Fig. 12.
Handgebläse.

Verlöten von Glas mit Metall und ähnliches s. S. 366

Kühlen. Nachdem die eigentliche Verschmelzung ausgeführt ist, muß man — besonders bei komplizierteren und dickwandigen Stücken! — längere Zeit „kühlen", damit sich keine gefährlichen Spannungen im Glas ausbilden können. Man umspült das Stück dazu mit der größten, leuchtenden Flamme, verkleinert diese allmählich und dreht das geblasene Stück so lange in ihrer Spitze hin und her, bis es allseitig dick berußt ist. Bis zum völligen Erkalten soll es dann noch vor Zugluft geschützt werden; eventuell wickelt man dicke Lagen von Papier um die geblasene Stelle. Wenn man ganz sicher gehen will, oder wenn die geblasene Stelle besonders gefährdet erscheint, so heizt man vorher einen kleinen elektrischen Ofen (10. Kapitel) auf 400—450°, stellt das Rohr unmittelbar nach dem Blasen hinein, läßt die Temperatur 3—6 Stunden auf der angegebenen Höhe und verringert dann den Heizstrom so allmählich, daß das vollständige Erkalten 10—30 Stunden dauert.

Handgebläse. Viel häufiger als der „gelernte" Glasbläser wird der Physiker unhandliche, längere Röhren mit Stativen fixieren und die zu verschmelzende Stelle mit dem in der Hand gehaltenen Gebläse be-

liefert Arthur Pfeiffer, Wetzlar, das zweite (Fig. 12) ist in der Institutswerkstatt gefertigt. Die etwa 20 cm langen Messingröhren L und G sind für Luft bzw. Gas; die Flamme brennt aus dem seitlichen Loch über „G“ ist gut zugespitzt, und der schlanke Bau des Gebläses ist eine besondere Annehmlichkeit. — Man erweicht die Ränder der beiden zu verschmelzenden Röhren, staucht sie zusammen, so daß sie dicht sind, und verbläst dann Stelle für Stelle durch starkes Erhitzen. Eine Öffnung, die sich nicht schließen will, da die Beweglichkeit der beiden Teile nicht ausreicht, kann man ohne besondere Schwierigkeit mit einem (bereit gehaltenen!) dünnen Glasstäbchen zusammenziehen. (Es sei bemerkt, daß der Versuch, an ein mehrere Zentimeter weites Rohr ein enges Röhrchen rechtwinklig anzusetzen, mit dem Handgebläse kaum je gelingen dürfte, da man das weite Rohr nicht auf dem ganzen Umfang genügend hoch erhitzen kann.)

d) Behelfsmäßige Verbindung von Glasrohr mit Glas, Metall, Quarz usw. Glas löten. Schon WUNDT hat gezeigt, daß man Glas mit anderem Material verlöten kann, wenn man es mit einer eingebrannten Silber- oder besser Platinhaut (s. Kap. 5) überzieht und diese galvanisch verkupfert. RIDYARD[6]) überzieht platiniertes Hart-, Quarz-, gewöhnliches Glas oder auch Porzellan mit einer dünnen Bleihaut und verlötet die so vorbereitete Stelle mit Metall. Diese Verbindung hält auch bei Temperaturen von 150° ein Vakuum von 10^{-4} mm Quecksilber mehrere Tage lang. — In einfacher Weise verbindet man Glas- und Metallrohre, indem man eine schwach verjüngte Stelle stramm mit vorher verzinntem Kupferdraht bewickelt und in das Metallrohr einlötet[7]). Die Lötung hält flüssigkeitsdicht und zeichnet sich durch große mechanische Festigkeit aus.

Emaille als Kitt. Einen Emaillefluß, der auf gewöhnlichem Glas und Metall (Messing, Kupfer, nicht Aluminium) sehr fest haftet, bei 350° zu erweichen beginnt, in der Bunsenflamme aber bereits tropfbar flüssig ist, stellt man durch Zusammenschmelzen von 5 g geschlämmter Kieselsäure, 16 g Mennige und 4 g kalziniertem Borax in einem hessischen Tiegel her. Es hat sich jedoch gezeigt, daß Planfenster, die auf diese Weise aufgekittet wurden, häufig nach mehreren Wochen sprangen. Das vakuumdichte Einschmelzen von Kupferdrähten gelingt mit demselben nur schwer, besser das Aufschmelzen größerer, dünnwandiger Kupfer- oder Stahlkalotten. — MCKELVY[8]) empfiehlt einen durch Zusammenschmelzen gleicher Gewichtsteile von Zinkoxyd, Borax und

---

6) H. N. RIDYARD, Journ. Amer. Chem. Soc. 46, 287. 1924.

7) Nach einer freundl. Mitteilung von Herrn Prof. H. ZAHN.

8) [illegible]

Natronglaspulver gewonnenen Emaillefluß — Auch der oben (S. 357) erwähnte Chlorsilberkitt wird in ähnlichen Fällen in Frage kommen.

Abgebrochene Platindrähte an den Polen von Geißlerröhren die die Befestigung des stromzuführenden Drahtes nicht mehr gestatten, repariert man[9]) auf folgende Weise Man verzinnt das Ende eines Lamettastreifens stark, bestreicht die Bruchfläche des Platindrahtes mit einer Spur Lötfett (Fludor) und drückt das verzinnte Ende mit dem heißen Kolben darauf Liegt das abgebrochene Ende zu tief, so umgibt man die Stelle mit einem kleinen Wall aus Gips, streicht eine Spur Fludor hinein, läßt von dem genäherten Lötkolben einen Tropfen flüssiges Lot hineinfallen und taucht, ehe dieser erstarrt den Zuführungsdraht ein. — Die gelötete Stelle muß durch einen Überzug aus Kitt (Picein) geschützt werden.

2. Glas schleifen, schneiden und ätzen.

a) Glas schleifen. Glas läßt sich auf dem rotierenden Schleifstein und auf der Schmiergelplatte leicht bearbeiten. Ersteren benutzt man z. B. um eine nicht ganz gerade gesprungene Kante einer Platte zu korrigieren, um sie rund oder facettiert zu schleifen. Um kleine Flächen, z. B. den umgebördelten, flachgedrückten Rand eines Rohres, auf das ein Fenster aufgekittet werden soll, zu ebnen, ferner um Glasplatten zu mattieren, verwendet man eine 5—10 mm dicke Glasplatte, auf die Schmiergel (mittlerer Körnung) und Wasser aufgebracht wird. Auf die Rückseite der zu mattierenden Platte wird ein Holzklötzchen als Griff aufgekittet; das Rohr faßt man möglichst weit unten und schleift, indem man das Stück in kleinen Kreisen mit mäßigem Druck auf der Schmirgelplatte reibt. Feineres Korn erhält man durch Anwendung von „Polierrot" (Englischrot, Pariserrot, Caput mortuum); eine polierte, optisch plane Fläche herzustellen, gelingt jedoch auf so primitive Weise nicht. Geschliffenes Metall pflegt, wenn man es auf der von Schmirgel befreiten matten Platte reibt, schöne Politur anzunehmen.

Löcher von einigen Zentimetern Durchmesser schleift man auf folgende Weise in Glasplatten: In die Stirnfläche eines Messing- oder Kupferrohres von dem gewünschten Durchmesser (außen) werden zahlreiche Kerben gefeilt; man spannt das Rohr auf die Drehbank und bohrt zunächst damit ein Stück Pappdeckel aus. Dieser wird (mit Wachs-Kolophonium) auf die Glasplatte gekittet, um eine seitliche Bewegung des Bohrers zu verhindern. Man bestreicht die Stirnfläche des Bohrers mit einem dicken Brei aus Schmirgel und Wasser, läßt ihn rotieren und schleift durch mäßiges Gegendrücken der Platte das Loch ein. Das Aus-

springen des Glases auf der Rückseite wird vermieden, wenn man von beiden Seiten her bis zur Mitte der Platte schleift. Der Bohrer muß immer wieder mit Schmirgelbrei befeuchtet werden. — Massive Glasstücke können ähnlich mit einer (stumpf gewordenen) Kreissäge oder mittels eines halb herumgelegten Drahtes unter Verwendung von Schmirgelbrei durchgeschliffen werden. — Glasstöpsel und Hähne, die nicht dicht schließen, können sehr einfach nachgeschliffen werden, nur muß man nach wenigen Drehungen den Stöpsel herausziehen und den Schmirgel neu verteilen, sonst schleifen sich Rillen ein.

b) Glas bohren. Löcher von wenigen Millimetern Durchmesser können ohne Zuhilfenahme von Schmirgel mit einem möglichst gut gehärteten Bohrer oder mit einer kleinen, spitz geschliffenen Feile in Glas gebohrt werden. Als Schmiermittel dient Terpentinöl, besser eine Lösung von Kampfer in Terpentinöl. Der Beginn des Bohrens wird erleichtert, wenn man mit dem Diamanten ein kleines Kreuz in die Oberfläche ritzt

c) Glas mit dem Diamanten schneiden. Die in einem charakteristisch geformten Griffel gefaßten, eigentümlich geschliffenen „Glaserdiamanten“ sind in Metallwaren- und Glasgeschäften erhältlich. Führt man den Diamanten mit mäßigem Druck, aber in der richtigen Neigung über die Glasoberfläche, so entsteht ein singendes Geräusch, und der seichte Ritz zeigt die Tendenz, nachträglich in einen Sprung auszuarten. Bei einer nur wenig abweichenden Neigung kratzt der Diamant, der Ritz ist zwar breiter, das Glas springt aber nicht. Außerdem wird der Diamant dadurch allmählich geschädigt. Es empfiehlt sich daher, einen Diamanten auf die günstigste Stellung und den günstigsten Druck (im Geschäft) auszuprobieren und diesen allein zu benützen. Nach dem Schnitt dreht man die Platte um und klopft mit dem Hinterende des Griffels auf den Ritz; man kann dann beobachten, wie sich ein Sprung bildet und die Platte bricht durch leichtes, ziehendes Biegen glatt auseinander. Zum Schneiden photographischer Platten in der Dunkelkammer auf bestimmte Formate ist die Anfertigung einer Schablone anzuraten, die aus einem Brettchen besteht, auf dem das Lineal unter Zwischenlage von zwei Pappdeckelstückchen so festgeschraubt ist, daß man die Platte darunterschieben kann. Zwei in der richtigen Entfernung eingeschlagene Nägel dienen als Anschlag für die Platte.

d) Der Schreibdiamant ist ein Griffel von der Form eines Bleistiftes, in dessen Spitze ein kleines, kantiges Diamantsplitterchen gekittet ist Man benötigt ihn zum Einritzen feiner Schriftzeichen oder Teilungen in Glas oder Quarz. Um möglichst feine Striche zu ziehen,

probiert die günstigste Stellung des in das „Reißerwerk" der Teilmaschine eingespannten Griffels sorgfältig aus, indem man Strichproben unter einem stark vergrößernden Mikroskop betrachtet Ohne besondere Schwierigkeiten gelingt es so, Furchen von nur ca. 1 μ Breite zu ziehen.

e) Glas ätzen. Fluorwasserstoff löst Kieselsäure unter Bildung von Fluorsilizium und ätzt daher Glas und Quarz an. Meist verwendet der Physiker die in Kautschukflaschen erhältliche, ca. 50 proz. wäßrige Lösung von Fluorwasserstoff: „Flußsäure" Die Lösung raucht an der Luft, und die Dämpfe wirken stark ätzend und giftig! Die Glasteile, die nicht mitgeätzt werden sollen (auch die Unterseite der Platte!), schützt man durch einen auf die erwärmte Platte aufgetragenen Überzug, den „Ätzgrund"· Wachs, Paraffin, Picein. Sehr gut ist folgendes, von Frick angegebenes Rezept: 4 Teile weißes Wachs, 2 Mastix, 1 Asphalt und 1 Terpentin werden $^1/_2$ Stunde geschmolzen erhalten, so daß sich die Verunreinigungen zu Boden senken. Dann gießt man den oberen Teil der Schmelze in kaltes Wasser, formt einen eigroßen Ballen daraus und hüllt ihn in Seidenzeug. — Die Glasplatte wird erwärmt und mit dem Ballen, dessen Oberfläche unter der Seide schmilzt, bestrichen. Der Aufstrich schützt genügend, auch wenn er sehr dünn ist. Nach Cotton[10]) kann man die Silberschicht einer versilberten Platte als Ätzgrund verwenden. In den Ätzgrund ritzt man die Zeichnung und bestreicht sie mit einigen Tropfen Flußsäure, die man ständig auf den Strichen verteilt. Als Pinsel benützt man eine Feder oder einen Holzspan. Nach einigen Minuten (Vorversuch!) wäscht man mit fließendem Wasser und entfernt den Ätzgrund durch Erwärmen. Eventuell kann die Teilung mit schwarzer oder roter Ölfarbe eingerieben werden, deren Überschuß man durch Abwischen mit steifem Papier entfernt.

Man kann die Ätzung auch mit gasförmigem Fluorwasserstoff ausführen, den man durch Einwirkung von konzentrierter Schwefelsäure auf pulverisierten Flußspat herstellt. Als Gefäß benützt man einen Trog aus Bleiblech und erwärmt etwas, um die Reaktion zu beschleunigen. Mit gasförmiger Flußsäure wird die geätzte Fläche matt, mit flüssiger klar. Bei feinen Linien ist der Unterschied jedoch nicht groß.

Das Ätzverfahren kann zur Herstellung sehr feinkörniger, gut lichtdurchlässiger Mattscheiben angewandt werden. Näheres siehe „Technische Kunstgriffe" (l. c. Fußnote S. 347).

Will man aus sehr dünnem Glas (z. B. Mikroskopdeckgläschen, 0,18 mm) runde Scheibchen ausschneiden, so ätzt man einen in den Ätzgrund eingeritzten Kreis längere Zeit und kann das Scheibchen dann herausbrechen. (Herstellung von Galvanometerspiegeln vgl. S. 383.)

Viertes Kapitel.

Versilberung von Glas und verwandte Methoden zur Herstellung dünner Metallüberzüge.

1. Chemische Verfahren. Versilbern, Vergolden, Verkupfern von Glas, Quarzglas, Kristallen.

Schon LIEBIG zeigte, daß man durch Reduktion einer Silbernitratlösung einen zusammenhängenden, glänzenden Silberniederschlag erhalten kann. Im allgemeinen wird hierbei jedoch das Silber als schwarzes Pulver ausfallen, nur bei Einhaltung ganz bestimmter Konzentration, Temperatur und vor allem bestimmter Reduktionsmittel gelingt die Erzeugung einer spiegelnden Silberschicht. Bei allen angegebenen chemischen Verfahren ist das erste Erfordernis zum Gelingen die größte Sauberkeit der zu versilbernden Flächen und aller Gefäße.

Reinigung zum Versilbern. Nachdem man einen etwa noch vorhandenen alten Silberbelag mit Salpetersäure aufgelöst und flüchtig mit Wasser abgespült hat, bringt man den Spiegel in die Glasschale, in der er versilbert werden soll. Man gießt starke Kali- oder Natronlauge 5—10 mm hoch ein, läßt $^{1}/_{2}$—24 Stunden zugedeckt stehen und reibt dann die Oberfläche mit einem in ein Glasrohr gesteckten Wattebausch sorgfältig ab.

Die **Lauge** bereitet man durch Auflösen von 3—4 Stangen Natrium- oder Kaliumhydroxyd (Natrium anhydricum depuratum) in 200 bis 300 cm^3 Wasser. Bei der Lösung wird eine erhebliche Wärmemenge frei! Statt der Behandlung mit Lauge wird von einigen empfohlen, mit Seife zu waschen.

Man gießt die Lauge zum Vorrat zurück, spült kräftig mit Wasser, gießt reine, konzentrierte Salpetersäure auf, läßt auch diese längere Zeit einwirken und reibt wieder mit einem (frischen) Bausch von Watte oder Asbestwolle. Um die Oberfläche gründlicher zu säubern, bringen einige Autoren auf den ersten oder den zweiten Bausch etwas Polierrot. Wesentlich ist, daß die gereinigte Oberfläche vollkommen fettfrei ist, so daß sie von Wasser gut benetzt wird. Salpetersäure löst Fett verhältnismäßig schlecht und kann geradezu damit verunreinigt sein. Trägt man Bedenken, ob die verfügbare Säure einwandfrei ist, so benutzt man besser „Chromschwefelsäure". Diese stellt man durch Auflösen von etwas (pulverisiertem) Kaliumbichromat oder Chromsäure in konzentrierter Schwefelsäure her (etwa 10 g pro Liter). Die dunkelbraune Flüssigkeit ist ein außerordentlich aggressives Reinigungsmittel; sie wirkt kräftig oxydierend und färbt sich dabei grün. Man kann

mit Wasser wird sie sehr heiß, daher Vorsicht beim Eingießen in feuchte Gefäße!

Nach der Behandlung mit Säure wird mehrmals mit gewöhnlichem, dann einige Male mit destilliertem Wasser gespült und der Spiegel unter destilliertem Wasser aufbewahrt[1]). — In ähnlicher Weise reinigt man alle Gefäße, die zum Ansetzen der Flüssigkeiten dienen; nur das Abreiben mit Watte ist nicht nötig.

a) Verfahren, die einen kräftigen, undurchsichtigen Niederschlag erzeugen.

Rezept von Brashear. Sehr kräftige Schicht. Diese Methode wird zum Versilbern der großen Reflektorspiegel, bei denen die Silberschicht poliert wird, wohl ausschließlich angewandt. Zum gelegentlichen Versilbern eines kleinen Galvanometerspiegelchens ist sie unpraktisch, und wenn in letzterem Fall noch keine Reduktionslösung vorhanden ist, kommt sie überhaupt nicht in Frage Die Brashearsche Reduktionslösung muß nach dem Ansetzen mindestens einen Monat, womöglich mehr als ein Jahr lagern, bis sie ihre volle Güte erreicht. Sie bekommt dann einen erfrischenden, aromatischen Geruch und bleibt unbegrenzt haltbar.

Reduktionslösung R:

Destilliertes Wasser	500 cm³
Reiner Zucker (Kandiszucker)	45 g
Konzentrierte Salpetersäure	2 cm³
96 proz. Alkohol	87 „

Die angegebene Reihenfolge der Zusätze ist einzuhalten.

Silberlösung S:

Diese Lösung muß jedesmal frisch bereitet werden; zur Not kann man sie noch am nächsten Tag verwenden. Das angegebene Quantum gilt für einen Spiegel von 200 cm² Oberfläche. Man bereitet vor: Drei gereinigte und getrocknete Erlenmeyerkölbchen von 150 (1), 20 (2) und 15 (3) cm³ Inhalt, eine Bürette (4) von 20 cm³ und eine Mensur (5) von 50 cm³. In (1) wiegt man 4 ± 0,1 g Silbernitrat ab und fügt 40 cm³ destilliertes Wasser hinzu; in (2) 2 ± 0,1 g alkoholgereinigtes, möglichst karbonatfreies Ätzkali oder Ätznatron und fügt 20 cm³ destilliertes Wasser hinzu. Die Bürette füllt man mit (käuflichem) Ammoniak. Von der Silbernitratlösung in (1) wird ungefähr $^1/_3$ in das Kölbchen (3) ge-

[1]) Die Silberschicht soll besser haften, wenn die Spiegelfläche vor der Spülung mit destilliertem Wasser in einer starken Lösung von Zinnchlorür (Zinndichlorid.

gossen Zu dem Rest ($^2/_3$) läßt man aus der Bürette vorsichtig unte starkem Schütteln Ammoniak eintropfen, bis der zuerst entstehend schokoladenfarbige Niederschlag von Silberhydroxyd sich eben wiede gelöst hat. Dazu sind ungefähr 6 cm³ Ammoniak erforderlich. Hierau gießt man unter kräftigem Schütteln des Kolbens die Lauge (2) zu. E entsteht ein dicker Niederschlag, schwarz bei Kalium-, dunkelbraun b Natriumhydroxyd. Sogleich gibt man weiter Ammoniak zu, bis de Niederschlag wieder verschwindet, dann etwas von der Reservesilbe lösung in (3), bis er sich (schwach) wieder bildet, dann wieder einig Tropfen Ammoniak und so fort, bis alle Reservesilberlösung verbrauch ist Man benötigt hierzu etwa 8,5 cm³ Ammoniak, im ganzen also etw 14,5 cm³. Die letzte Zugabe soll Silberlösung sein. Wesentlich ist, da die Lösung zuletzt schwach getrübt, graugelb gefärbt ist. Sie wird nu filtriert (durch einen in den Trichterhals gestopften, lockeren Watt pfropfen) und sofort verwendet. Bei längerem Stehen kann sich Silbe azid bilden, das sehr explosiv ist.

Die eigentliche Versilberung geht nun so vor sich: Der wie obe angegeben gereinigte Spiegel liegt in einer Schale in einer Mischung vo 200 cm³ destilliertem Wasser und 26 cm³ Reduktionslösung R[2]). Ma prüft die Temperatur der Flüssigkeit, die 17 bis höchstens 19° betrage soll, und gießt unter Schwenken der Schale die eben hergestellte Silbe lösung S hinzu. Fast momentan färbt sich die Flüssigkeit wie verdünnt Tinte; nach einiger Zeit, vielleicht $^1/_2$ Minute, bedecken sich die Wänd mit einer stark reflektierenden Silberschicht, die Flüssigkeit wird lehm farben, und in ihr entsteht ein grauer Niederschlag, der durch dauernd Schwenken der Schale am Absetzen verhindert werden soll[3]). Nac wenigen Minuten ist die Reaktion beendet.

Fehler in dem Verfahren kann der Unerfahrene fast nur daran e kennen, daß die Silberschicht dünn ist und sich leicht abwischen läß Sie sind häufig durch zu hohe oder tiefe Temperatur bedingt oder durc die zeitlich veränderliche Wirksamkeit der Reduktionslösung. Vor de Versilberung eines größeren Spiegels soll man daher einige Vorversuch mit einigen Kubikzentimetern Lösung S anstellen, bei denen man di vorschriftsmäßige Menge von R um 25% vergrößert und verkleinert. - Ist eine besonders kräftige Silberschicht nötig, so kann man die Ve silberung zweimal mit je der Hälfte der Lösung ausführen.

---

[2]) Sehr große Spiegel kann man mit einem (mit Paraffin festgegossenen) Ran von paraffiniertem Papier umgeben und so als Boden des Troges benützen.

[3]) Bei größeren Spiegeln kann man die Schicht während der Abscheidung vo

Wenn sich dicke, graugelbe Flocken in der Flüssigkeit gebildet haben, gießt man sie fort, spült einige Male mit destilliertem Wasser und stellt den Spiegel, den man auch an den Kanten nur mit fettfreien, frischgewaschenen Fingern anfassen soll, hochkant zum Trocknen. Will man ihn als „rückseitig versilberten Spiegel“ brauchen, d. h. sollen die Strahlen durch das Glas hindurchgehen, so wird die Silberschicht einfach durch einen Lacküberzug geschützt und die Glasseite, falls sich etwas Silber darauf niedergeschlagen hat, mit einem mit etwas verdünnter Salpetersäure befeuchteten Filtrierpapierbausch abgerieben. Schwieriger ist die Behandlung, wenn die Vorderfläche der Schicht reflektieren soll. Diese zeigt nämlich zunächst eine milchige Trübung, einen „Reif“, der durch Polieren entfernt werden muß. Man verwendet dazu sämisch gegerbtes Leder, mit dem man zuerst die Schicht einige Zeit mit zartem Druck reibt, um sie zu verdichten. Dann bringt man etwas Polierrot auf das Leder und poliert längere Zeit, bis der erwähnte Reif völlig verschwunden ist. Das käufliche Polierrot ist vielfach nicht fein genug und hinterläßt dann einen „Strich“, d. h. man kann die Richtung des Reibens an vielen, mikroskopisch feinen Kratzern erkennen. Verfasser erhielt erst durch die freundliche Hilfe der Firma Steinheil Söhne (München) ein einwandfreies Präparat. — Es ist vielleicht besser, zwischen Versilbern und Polieren einige Tage vergehen zu lassen.

Konservierung der Spiegel. Die Silberschicht, deren Reflexionsvermögen (nach englischen Quellen) im sichtbaren Gebiet 98% betragen soll, läuft allmählich durch Bildung von Schwefelsilber an. Dies läßt sich bedeutend verzögern, wenn man bei Nichtgebrauch des Spiegels die Schicht durch einen Schirm aus Filtrierpapier schützt, der mit einer 10proz. Bleiazetatlösung imprägniert ist, oder wenn man sie mit Zaponlack firnißt, wodurch natürlich die optische Güte des Spiegels etwas leidet.

Die Firma J. D. Möller, Wedel bei Hamburg, stellt aus eingesandten Glasplatten tadellose oberflächenversilberte Spiegel her

Rezept von Böttcher. Kräftige Schicht. Das Böttchersche Verfahren eignet sich besonders für das physikalische Laboratorium, wo man gelegentlich ein Glasstreifchen oder einen Galvanometerspiegel zu versilbern hat und nicht viel Zeit auf diese Arbeit verwenden möchte. Die beiden Lösungen S und R halten sich nämlich (lichtgeschützt) etwa 1/2 Jahr lang, brauchen zur Versilberung nur im Verhältnis 1:1 gemischt zu werden, und die Temperatur hat viel geringeren Einfluß als beim Brashearschen Verfahren. Dagegen ist der Niederschlag hier zarter als bei jenem und läßt sich nicht so gut polieren. — Die Methode ist in den „Technischen Kunstgriffen“ (l. c. Fußnote S. 347) besonders aus-

Reinigung des Spiegels wie oben (S. 370) angegeben.

Man bereitet vor: 2 Erlenmeyerkolben von je 500 cm³ Inhalt, 1 Kolben von 100, 1 Bürette von 20 cm³, 3 Reagenzgläser. In letzteren wiegt man ab: 5 ± 0,1 g Silbernitrat, 1 ± 0,02 g Silbernitrat; 0,83 ± 0,01 g „Seignettesalz" (Kalium-Natriumtartrat). Die beiden letzteren Salze löst man in den Reagenzgläsern in etwas destilliertem Wasser.

Silberlösung S:

Man löst in einem $^1/_2$-Liter-Kolben die 5 g Silbernitrat in ungefähr 200 cm³ Wasser. Etwa $^1/_3$ der Lösung kommt, wie bei Brashear, in Reserve in das kleine Kölbchen. Man läßt aus der Bürette Ammoniak zulaufen, bis der anfänglich entstehende schokoladenbraune Niederschlag wieder verschwunden ist, gibt Reservesilber zu, bis er sich wieder bildet, und setzt das Verfahren fort, bis alles Reservesilber verbraucht ist und die Lösung eine zarte Opaleszenz zeigt. Sollte das Reservesilber zuletzt nicht ausreichen, so löst man noch etwas Silbernitrat in Wasser und gibt davon tropfenweise zu, bis sich die Trübung, die hier schwächer sein soll als bei Brashear, zeigt. Dann wird die Lösung filtriert und mit destilliertem Wasser auf 500 cm³ verdünnt.

Reduktionslösung R:

In dem zweiten $^1/_2$-Liter-Kolben bringt man 500 cm³ destilliertes Wasser zum Sieden. Dann gießt man die Lösung von 1 g Silbernitrat zu. (Dabei Vorsicht wegen des Siedeverzugs!) Hierauf, wenn die Lösung wieder siedet, die Seignettesalzlösung. Die Lösung färbt sich erst braun, dann grau. Nach 1—2 Minuten ist die Reaktion beendet, der graue Niederschlag wird abfiltriert und die Lösung abgekühlt

Zur Versilberung gießt man auf den in der Schale liegenden, von der vorhergehenden Reinigung noch feuchten Spiegel 1 Teil S und 1 Teil R; die Reihenfolge ist beliebig, das Mischungsverhältnis braucht nicht genau eingehalten zu werden. Es ist besser, aber nicht unbedingt notwendig, die Flüssigkeit in Bewegung zu halten. Anders als bei Brashear bleibt die Flüssigkeit mehrere Minuten lang klar, während sich langsam auf den Wandungen ein Hauch von blau durchscheinendem Silber bildet. Dieser verstärkt sich, die Lösung wird trüb, und auf ihrer Oberfläche bilden sich Inseln von ausgeschiedenem Silber. — Zu alte Lösungen geben erst, wenn die Trübung eingetreten ist, einen schwachen Silberspiegel.

Die weitere Behandlung des Spiegels ist ebenso wie bei Brashear. Die Silberschicht, die hier nicht den milchigen Reif, sondern eine goldene Färbung zeigt, kann auch poliert werden, wenn auch nicht so gut wie

Rezept von COTTON. Kräftige Schicht. Vielfach verwendet man als Reduktionsmittel Traubenzucker oder Formalin. Des letzteren bedienen sich die Rezepte der Gebrüder LUMIÈRE[4]) und von IRWING[5]). Kürzlich hat COTTON[6]) eine Methode angegeben, die vielleicht noch etwas bequemer zu handhaben ist als die BÖTTCHERsche. Nach COTTON löst man 15 ± 2 g Silbernitrat in einem Literkolben in destilliertem (chlorfreiem) Wasser und fügt (wie oben!) so viel Ammoniak hinzu, bis der Niederschlag eben verschwindet. Dazu sind etwa 17 cm³ erforderlich. (Hier soll also die Lösung klar sein!) Man verdünnt auf 1 l und notiert die Temperatur (ϑ). — Die zur Versilberung günstigste Formalinmenge wird jedesmal durch Vorversuche bestimmt: Zu 15 ccm der Lösung S setzt man zunächst 13 Tropfen (Tropfgläschen!) Formalin. Diese Menge ist richtig, wenn sich die Lösung nach wenigen Sekunden grauviolett-opaleszierend färbt, dann, während an der Wand der Silberspiegel entsteht, blauschwarz und später eisengrau wird. Die günstigste Temperatur ist die, bei welcher die Lösung angesetzt worden war (ϑ). Man nehme so viel Lösung S, daß der Spiegel einige Millimeter hoch bedeckt ist, tropft das Formalin in ein zweites Gefäß, mischt durch mehrmaliges Umgießen, schüttet die Flüssigkeit sofort über den Spiegel und schaukelt die Schale während der Abscheidung des Silbers. — Um besonders dicke Schichten zu erzielen, kann man die Versilberung wiederholen.

Die weitere Behandlung und Politur des Spiegels erfolgt ebenso, wie oben (S. 373) beim BRASHEARschen Verfahren angegeben.

Chemische Vergoldung nach WERNICKE. Im Jahre 1868 hat W. WERNICKE ein Rezept zur Herstellung von Goldspiegeln angegeben, das, da es anscheinend ziemlich in Vergessenheit geraten ist, hier in extenso angeführt werden möge[7]):

„Man bereitet zur Herstellung einer glänzenden und fest haftenden Goldschicht auf Glas drei Lösungen, welche man längere Zeit aufbewahren kann und zum Gebrauche nur in bestimmten Verhältnissen zu mischen hat.

1. Eine Lösung von Goldchlorid in Wasser, welche in 120 cm³ 1 g Gold enthält. Man löst hierzu das Gold in möglichst wenig Königswasser, verdampft im Sandbade die überschüssige Säure und verdünnt dann bis auf 120 cm³. Es ist hierbei nicht notwendig, das salzsäurehaltige Gold-

---

[4]) A. und L. LUMIÈRE, Journ. d. Phys. 4, 29. 1895.

[5]) The Physical Soc. of London and the Optical Soc. A discussion on „the making of reflecting surfaces". London, The fleetway Press 1920.

[6]) A. COTTON, Rev. d'optique 3, 57. 1924.

chlorid bis zur Bildung des Chlorürs zu erhitzen, weil ein ganz geringer Gehalt an Säure für die Bildung eines guten Spiegels nicht von Belang ist Dagegen muß diese Goldlösung absolut frei von solchen Metallen sein, welche durch die Reduktionsflussigkeit metallisch ausgeschieden werden, namentlich frei von Silber

2. Eine Natronlauge vom spezifischen Gewicht 1,06 Diese braucht nicht rein zu sein

3 Die Reduktionsflüssigkeit. Man mischt 50 g englischer[8]) Schwefelsäure mit 40 g Alkohol und 35 g Wasser, destilliert nach Zusatz von 50 g feinem Braunsteinpulver im Sandbade bei gelinder Wärme und leitet die Dämpfe in eine mit 50 g kalten Wassers gefüllte Flasche. Man destilliert so lange, bis sich das Volumen des vorgeschlagenen Wassers verdoppelt hat Die erhaltene Flüssigkeit, welche Aldehyd und etwas Essig- und Ameisenäther enthält, versetzt man mit 100 cm^3 Alkohol und 10 g mittels Salpetersäure invertierten Rohzuckers und ergänzt die Mischung durch Zusatz von destilliertem Wasser auf 500 cm^3 Die Überführung des Zuckers geschieht in der Weise, daß man 10 g gewöhnlichen Rohrzuckers in 70 cm^3 Wasser löst, die Lösung mit 0,5 g Salpetersäure vom spezifischen Gewicht 1,34 versetzt und eine Viertelstunde lang kocht.

Diese Reduktionsflussigkeit, in gut verkorkten Flaschen aufbewahrt, läßt sich mehrere Monate hindurch mit gleichem Erfolge benutzen

Um nun einen Plan- oder Hohlspiegel herzustellen, mischt man in einem passenden Glasgefäß einen Teil der Natronlauge mit dem vierfachen Volumen der Goldlösung und fügt alsdann $^1/_{35}$ bis höchstens $^1/_{30}$ des Ganzen von der Reduktionsflüssigkeit hinzu. Die Mischung färbt sich schnell grün von ausgeschiedenem Golde; man bringt sie sogleich mit der zu vergoldenden Glasfläche in Berührung, und zwar so, daß sich das Gold von unten nach oben ansetzen kann. Die Schnelligkeit der Vergoldung ist von der Temperatur abhängig. Bei einer mittleren Zimmerwärme von 19° C beginnt der Spiegel sich nach 30 Minuten zu bilden, nach $1^1/_2$ Stunden ist er mit prächtig grüner Farbe durchsichtig, und nach $2^1/_2$—3 Stunden hat er eine solche Dicke erreicht, daß er nur eben mit tief dunkelgrünem Lichte durchscheinend ist. Bei 55—60° C geht derselbe Prozeß schon nach 20—15 Minuten vor sich, bei 75° noch schneller; eine höhere Temperatur anzuwenden, ist jedoch unzweckmäßig, weil das Gold alsdann weniger fest am Glase zu haften scheint. Innerhalb der angegebenen Grenzen ist die Güte der Spiegel in bezug auf Glanz und Haltbarkeit dieselbe, allein es kann zuweilen vorkommen, daß in der Wärme die in der Flüssigkeit stets in geringer Menge enthaltene Luft in Bläschen aufsteigt und hierdurch feine Löcher im Spiegel

verursacht, welche zwar nicht im reflektierten, wohl aber im durchgehenden Lichte sichtbar sind, aus diesem Grunde ist es, bei Anwendung von Wärme, zweckmäßig, die alkalische Goldlösung vor dem Zusatz der Reduktionsflüssigkeit, bevor man sie mit dem zu vergoldenden Glase in Berührung bringt, bis nahe zum Sieden zu erhitzen. Der auf die eine oder andere Weise erhaltene Spiegel wird mit Wasser sorgfältig abgespült und, auf Fließpapier mit der belegten Fläche nach unten schräg gegen eine Wand gestellt, bei gewöhnlicher Temperatur an der Luft getrocknet; er zeigt alsdann stets eine vollkommene Politur.

Die Vorbereitung und Reinigung der zu vergoldenden Gläser kann man in gleicher Weise wie bei der Versilberung bewerkstelligen."

Die letzte Reinigung des Spiegels soll jedoch hier mit Lauge, nicht mit Säure, erfolgen.

Verfasser erhielt kräftige, in der Durchsicht tiefgrüne Goldniederschläge durch Mischung von 10 ccm einer 2 proz. Lösung von gelbem Goldchlorid in Wasser mit 5 ccm einer 5 proz. Natronlauge und mit 1 ccm der BRASHEARschen Reduktionslösung R (S. 371). Die Lösung färbt sich sogleich grün, es dauert aber mehrere Stunden bis der Goldniederschlag entstanden ist Die Temperatur hat hier nur auf die Dauer der Ausscheidung, nicht auf die Schönheit des Niederschlages Einfluß. Das Polieren vertrugen die Spiegel (bei der Reduktion mit BRASHEARscher Lösung!) nicht.

Kupferspiegel nach FRENCH[2]. Die Verkupferung von Glasoberflächen bietet wesentlich größere Schwierigkeiten als die Versilberung oder Vergoldung. Kürzlich hat FRENCH, fußend auf früheren Versuchen von FARADAY (1857) und von CHATTAWAY (1907) das folgende Verfahren ausgearbeitet:

Reinigung der Glasoberfläche. Waschen mit konzentrierter Salpetersäure, dann mit Leitungswasser; hierauf legt man den Spiegel $^1/_2$ Stunde in 1 proz. Kaliumhydroxydlösung, wäscht ihn $^1/_2$ Stunde mit gewöhnlichem, dann mit destilliertem Wasser und poliert ihn mit einem Lappen, der auf folgende Weise vorbehandelt werden muß: Man kocht ihn mit Seife, faßt ihn dann nur mit einer Metallzange an und kocht ihn so lange in oft erneuertem Wasser, bis dieses ganz klar bleibt. Nur so läßt sich jede Spur von Fett entfernen. Der Lappen soll nur mit der Metallzange angefaßt werden.

Verkupferungslösung. Man bereitet eine 11,1 proz. Kaliumhydroxydlösung, ferner eine bei 16° gesättigte Lösung von Kupferhydroxyd in Ammoniak (dessen spez. Gew. 0,880) und filtriert sie durch

Glaswolle. — 9 g Hydrazinsulfat werden in 150 ccm destilliertem Wasser gelöst und die Flüssigkeit auf 60° erwärmt. Unter dauerndem Schütteln fügt man hierzu 90 ccm der Kupferlösung von 16°. Die resultierende Flüssigkeit hat eine klare, gelbe Farbe. Man reibt den Spiegel mit ihr ab. Unter weiterem Schütteln setzt man 87,5 ccm der gleichfalls auf 60° erwärmten Kalilauge zu. Die Flüssigkeit soll dann eine hellgelbe Farbe und keine Anzeichen von Fällung aufweisen. Sie wird sofort in eine Kupferschale gegossen, die in einem Wasserbad von 43° steht, der Spiegel mit der Schicht nach unten eingetaucht und dauernd in Bewegung gehalten. Nun erhöht man die Temperatur durch Heizung des Wasserbades langsam auf 57°. Die Flüssigkeit wird dunkelgrün und bleibt etwa 15 Minuten so, dann treten rosa Schatten auf und nach etwa 20 Minuten hat sich der Kupferüberzug gebildet. Um ihn zu verstärken hebt man den Spiegel aus dem Bad heraus, kühlt dieses etwas ab, gießt 50 ccm der Kupferlösung von 16° und 10 ccm der Kalilauge von 60° zu, bringt das Bad wieder auf 43°, taucht den Spiegel ein und erwärmt unter dauernder Bewegung des Spiegels auf 50°. Eine weitere Verstärkung erzielt man durch erneute Abkühlung auf 43°, Zugabe von 60 ccm einer Lösung von 1 g Hydrazinsulfat in der angegebenen Kupferoxyd-Ammoniaklösung und erneutes Erwärmen auf 50°.

Noch größere Verstärkung kann auf elektrolytischem Wege erzielt werden Der Elektrolyt wird wie folgt bereitet · Man löst 1 Teil Kaliumbitartrat in 10 Teilen Wasser, gibt dann soviel Kupferkarbonat zu, daß die Lösung gesättigt ist und macht sie hierauf durch etwas Kaliumkarbonat alkalisch. Die Stromstärke soll 0,25 Amp/dm^2 nicht übersteigen.

Die Auergesellschaft (Berlin O 17) stellt übrigens unter dem Namen „Aurophan" verkupferte Vakuummantelgefäße her.

b) Chemische Methoden zur Erzeugung eines dünnen, gleichmäßig durchscheinenden Silberniederschlages.

Durchscheinende Silberschichten benötigt man vor allem bei Interferometern zur Trennung des Lichtstrahles in zwei Teile, und zwar ist es hier erforderlich, daß die Schicht sehr gleichmäßig, ohne jede Andeutung einer wolkigen Struktur ist und außerdem gut reflektiert. Es scheint, daß die chemischen Methoden auf diesem Gebiet von der später zu beschreibenden (S. 381), umständlicher einzurichtenden Kathodenzerstäubung fast verdrängt worden sind. Allerdings hat Twyman neuerdings wieder ein chemisches Verfahren angewandt.

Rezept von EDER und STANSFIELD[10]) für halbdurchlässige Schicht: 1 g Silbernitrat in 20 ccm destillierten Wassers gelöst; Ammoniak wird hinzugegeben, bis der Niederschlag eben wieder gelöst ist. Dazu eine Lösung von 1,5 Kaliumhydroxyd in 40 ccm Wasser und abermals Ammoniak bis zur Lösung des Niederschlages. Dazu 80 ccm destilliertes Wasser, zuletzt tropfenweise Silbernitratlösung bis ein schwacher Niederschlag bleibt — Filtrieren und auf 300 ccm auffüllen. — Reduktionslösung R · 1,8 g Milchzucker in 20 ccm heißen destillierten Wassers gelöst. — Zum Versilbern 30 Teile S mit 2 Teilen R mischen. Man braucht 10 Minuten für Halbversilberung, eine Stunde für undurchlässige Schicht.

Rezept von PEROT und FABRY für halbdurchlässige Schicht:

Lösung S · 4 g Silbernitrat in 100 ccm destilliertem Wasser.

Lösung S′: 6 g Ammonnitrat in 100 ccm destilliertem Wasser.

Lösung R: 10 g Zucker in 100 ccm destilliertem Wasser gelöst, hierauf 2,3 g Weinsäure zugegeben. Man läßt die Lösung 10 Minuten sieden, setzt nach der Abkühlung 20 ccm Alkohol zu und verdünnt mit destilliertem Wasser auf 200 ccm.

Lösung R′: 10 g Kaliumhydroxyd in 100 ccm destilliertem Wasser. — Man mischt kurz vor dem Versilbern gleiche Teile S und S′, ferner R und R′ und gießt die Mischungen erst im Versilberungsgefäß zusammen.

ZWETSCH[11]) modifiziert eine früher von PFUND[12]) gegebene Vorschrift: Lösung S: 5 g Silbernitrat auf 500 ccm destilliertes Wasser mit soviel Ammoniak, daß der Niederschlag fast verschwindet (vgl. S. 374). Lösung R: 2,6% Formalin in destilliertem Wasser, am Tage vorher angesetzt. Gleiche Teile S und R werden gemischt. ZWETSCH findet als erster, daß die Beleuchtung der Lösung einen Einfluß auf die Geschwindigkeit der Reaktion ausübt: Beim Licht einer Quecksilberlampe erfolgt sie zu schnell, bei Lampenlicht zu langsam, gedämpftes Tageslicht ist am günstigsten.

Nach eigenen Erfahrungen kann man zum halbdurchlässig versilbern auch die BÖTTCHERsche Lösung (vgl. S. 378) mit zufriedenstellendem Erfolg benützen, wenn sie frisch hergestellt ist und wenn man den Spiegel so auf ein kleines Glastischchen legt, daß die Schicht nach unten gerichtet ist. Die Schale muß dauernd geschaukelt und die Reaktion unterbrochen werden, wenn die Schicht die richtige Dichte erreicht hat. Man beurteilt das am besten mittels einer Glühlampe, über die man die Schale während der Reaktion hält.

---

10) J. M. EDER und STANSFIELD, Nature 56, 504. 1897.

11) A. ZWETSCH, ZS. f. Phys. 19, 404. 1923.

Polieren halbdurchlässiger Spiegel Bei den bisher angeführten Verfahren empfiehlt es sich, das Reflexionsvermögen durch Politur zu steigern. Man benützt dazu eine Flaumfeder-Puderquaste, die man auf die Achse eines kleinen Elektromotors setzt, oder, da solche jetzt schwer erhältlich, einen abgedrehten, mit vielen Flaumfedern beklebten Holzkörper Man bepudert die Federn mit etwas Polierrot, läßt den Motor anlaufen und drückt den Spiegel gegen den Federkranz. Das Polieren dauert längere Zeit.

Für interferometrische Zwecke muß der Spiegel hell himmelblau durchscheinend und, wie erwähnt, frei von jeder Struktur sein.

Bei dem Verfahren von Twyman soll das immerhin heikle Polieren nicht nötig sein Twyman[13]) verwendet zwei Reduktionslösungen, von denen die eine ähnlich wie die von Brashear zusammengesetzt ist und auch mindestens zwei Wochen alt sein muß R_1 · 40 g Zucker, 20 ccm Alkohol, 1 ccm Salpetersäure mit destilliertem Wasser auf 200 ccm aufgefüllt. R_2. 40proz. (?) Formalinlösung. S · 2 g Silbernitrat werden in 20 ccm destilliertem Wasser gelöst und in der Weise, wie S. 372 und 374 beschrieben, soviel Ammoniak zugesetzt, daß ein zarter, graugelber Niederschlag resultiert. Man filtriert und verdünnt mit destilliertem Wasser auf 100 ccm. — Zur Versilberung hängt der mit Salpetersäure gereinigte und 5 Minuten lang in Chromschwefelsäure gebadete Spiegel in 100 ccm der Lösung S. Man gibt eine Mischung von je 5 ccm der Lösungen R_1 und R_2 zu, gießt die Flüssigkeit aber fort, sobald sich der Niederschlag zu bilden anfängt und versilbert dann in der Lösung S (ohne Zusatz von R!) weiter, bis die Schicht (in etwa 5 Minuten) die gewünschte Dicke erreicht hat.

2. Einbrennverfahren. Besonders für Platin und Gold, auch Silber und Iridium.

Das Verfahren besteht darin, daß eine Lösung des Edelmetallsalzes durch Erhitzen zerstört wird, wodurch sich ein Metallspiegel auf dem Glas (Quarzglas) bildet, der durch weiteres Erhitzen eingebrannt werden kann. Es empfiehlt sich, die vielfach recht kompliziert zusammengesetzten Lösungen fertig zu kaufen (Bezeichnung. „Glanzplatin", „Glanzgold" usw.; Bezugsquelle: W. C. Heraeus, Hanau; Deutsche Gold- und Silberscheideanstalt, Frankfurt a. M.). Nur die Lösungen zum Verplatinieren lassen sich auch in kleinen Mengen einfach herstellen.

Kundt[14]) gibt hierfür folgendes Rezept an: Man löst 1 g käufliches „Platinchlorid" (d. i. Platinchlorid-Chlorwasserstoffsäure, H_2PtCl_6) in

[13]) F. Twyman, Journ. Opt. Soc. 7, 635. 1923.

3 g absolutem Alkohol und gibt dazu 10 ccm einer konzentrierten Lösung von Borsäure in Alkohol, ferner 20 ccm einer Mischung von venetianischem Terpentin und Lavendelöl (von solchem Mengenverhältnis, daß eine dickflüssige Lösung resultiert). Die Flüssigkeit ist unbegrenzt haltbar, spaltet aber etwas Chlorwasserstoff ab und greift daher Korkstöpsel allmählich an.

RHEINBERG[15]) erhielt gleichmäßigere Spiegelflächen durch Vermeidung des Lavendelöles und durch Zusatz einer Wismutchloridlösung folgender Zusammensetzung: 1 g Wismutchlorid wird in 20 ccm Alkohol gelöst, 1 ccm Salzsäure zugesetzt und die Lösung kurz vor der Verwendung mit Alkohol auf 120 ccm verdünnt. Seine Platinierungslösung wird angesetzt durch Mischung von

3 ccm 6proz. Lösung von Schießbaumwolle in reinem Methylalkohol;
3 ccm 6proz. Lösung von „Platinchlorid" in Alkohol;
3 ccm Alkohol;
1 ccm Wismutchloridlösung von der oben angegebenen Zusammensetzung.

Man bestreicht die zu verplatinierende Glasfläche mit einer der angegebenen Lösungen und erwärmt vorsichtig, am besten in einem elektrischen Ofen. Die Flüssigkeit bräunt sich, verdampft, und bei weiterem Erhitzen erscheint der metallische Spiegel, der bei höherer Temperatur (500°) fest in die Glasoberfläche eingebrannt werden kann[16]). Dichtere Überzüge erhält man durch mehrfache Wiederholung des Verfahrens. Das Reflexionsvermögen derartiger Platinschichten ist für rotes Licht 70%, für blaues 56%. — Besonders häufig wird dieses Verfahren angewandt um Glas mit Metall zu verlöten[17]), oder um es mit einer chemisch indifferenten, elektrisch leitenden Schicht zu überziehen.

3. Niederschläge durch Kathodenzerstäubung.

Zur Herstellung von dünnen, besonders durchscheinenden Schichten von Silber, Gold, Palladium; auch Silizium, Selen.

Die Vorschriften verschiedener Physiker über die günstigste Anordnung gehen hier weit auseinander. Während der eine mit verhältnismäßig kleinen Spannungen (1000 Volt) arbeitet und Hochspannungsakkumulatoren benützt, verwendet der andere 10—15 000 Volt, die von einem Induktor oder Transformator — mit oder ohne Gleichrichtung des Wechselstromes — erzeugt werden. Die Drucke variieren von 1 bis

---

[15]) „The making of reflecting surfaces", Fußnote S. 375.

[16]) Herr STEINBACH fand (ZS. f. Phys. 33, 667. 1925), daß sich optische Spiegel schon bei 350° verziehen.

0,02 mm. Auch die besonders für die Herstellung von Interferometerspiegeln wichtige Frage, ob man in reinem Wasserstoff bessere Schichten bekommt als in (mit organischen Dämpfen verunreinigter) Luft, dürfte noch nicht eindeutig entschieden sein. Bekanntlich hat Herr M. DIECKMANN[18]) das Verfahren technisch ausgebildet. Bei seiner Anordnung wird der aufgerollte Stoff langsam unter der drahtförmigen Kathode durchgezogen. Verfasser sah dort silberbestäubte Zelluloidfolie von mehreren m² Fläche, die so rein blau durchscheinend war, wie ein guter Interferometerspiegel, obwohl bei der Anordnung fur Reinheit der Gasfüllung nicht Sorge getragen werden kann. Gute Niederschläge werden dabei nur bei einer bläulich-weißen Färbung der Entladung (im wesentlichen Swanspektrum) erhalten, nicht bei der bisweilen, aus unbekannten Gründen auftretenden rötlichen Färbung Von Wichtigkeit ist, daß große Stromdichte, uber 5 Milliampere/cm², bei der sich die Kathode fast bis zur Rotglut erhitzt, verhältnismäßig grobe, leicht wegwischbare Teilchen liefert, ferner, daß eine starke negative Aufladung der Auffangplatte den Niederschlag verhindern kann[19]).

Um (bei der Herstellung von Interferometerspiegeln, für die dieses Verfahren wohl am wichtigsten ist) möglichst gute Resultate zu bekommen, empfiehlt sich ein ziemlich großer Rezipient, Füllung mit reinem Wasserstoff, womöglich Kühlung mit flüssiger Luft, Abstand zwischen Kathode und Spiegelfläche mehrere Zentimeter, Verwendung von gleichgerichtetem Wechselstrom, Stromdichte 0,5—1,5 Milliampere/cm². Das Vakuum soll so hoch sein, daß der Kathodendunkelraum bis zu der Glasplatte reicht. Sehr gut ist es, den Spiegel beim Beginn der Zerstäubung abzuschirmen und den Schirm erst nach etwa ¼ Stunde wegzuziehen.

In Fig. 13 ist eine geeignete Apparatur abgebildet. Der Teller T des Rezipienten besteht aus Metall (Messing) und dient als Anode. Er trägt auf einer seitlich eingeschraubten, durch Glasrohr isolierten Säule A eine Brille aus Messingblech, die gleichfalls als Anode wirkt, und auf welcher die zu bestäubende Platte P mit der Schicht nach unten liegt. Die Kathode K, ein kreisförmiges Blech von etwa 50 mm Durchmesser, auf der Rückseite durch Glimmer geschützt, ist durch Glasrohr gegen den Teller isoliert. S ist ein Schirm, der durch einen nahe dem Rand des Rezipienten eingekitteten Glasschliff vor die Platte gedreht werden kann. In die Vakuumleitung VV ist eine „Ausfriertasche" (vgl. S. 385) eingeschaltet.

---

[18]) D. R. P. 418 356 (DIECKMANN); D. P. P. 260 278 (RAHN).

[19]) Vgl. auch F ROTHER und K. LAUCH. Phys ZS 24. 462. 1923; K. LAUCH

Das Metall der Kathode soll chemisch rein sein. Für Interferometerplatten verwendet man nach BURNS[20]) von 9000—5800 A. E. Kupfer, von 7500—3500 A. E. Silber, von 3500—2300 A. E. Nickel, darunter Aluminium oder Silicium, die jedoch schwer zerstäuben. — Die Schichten besitzen übrigens, wie KAHLER[21]) mittels der DEBYE-SCHERRER-Methode nachwies, kristalline Struktur. Die Phasenkorrektion bei Perot-Fabry-Platten kann sich infolge von allmählicher Kristallisation jahrelang ändern[20]).

4. Niederschläge durch Sublimation.

Metalle von nicht allzuhohem Schmelzpunkt, wie Aluminium, Magnesium, Zink, die Alkalimetalle u. a. sublimieren im hohen Vakuum sehr leicht und bilden auf einer dem kleinen, elektrisch geheizten Tiegel gegenüberstehenden Platte stark glänzende Spiegel[22]).

Fig. 13. Apparat für Kathodenzerstäubung.

Anhang: Galvanometerspiegel.

An die optische Qualität eines Galvanometerspiegels werden viel größere Anforderungen gestellt, als von manchen angenommen wird. So erklärt sich auch der verhältnismäßig hohe Preis guter Spiegel (Bezugsquelle: z. B. C. A. Steinheil Söhne, München). — Trotzdem ist es, wenn die Oberfläche des Spiegels nur einige Millimeter groß ist, ziemlich wahrscheinlich, daß man unter einer Anzahl von Spiegeln, die man aus gewöhnlichen Mikroskopdeckgläschen hergestellt hat, einige optisch befriedigende findet, geradeso wie man bei der Durchmusterung großer Stücke Spiegelglases meist einige Stellen finden wird, die für Perot-Fabry-Platten brauchbar sind (bei diesen Platten muß ja nur eine Oberfläche plan sein!).

Die Spiegelscheibchen stellt man aus Mikroskop-Deckgläschen durch Ätzung her, wie S. 369 beschrieben. Viele solcher Scheibchen werden gemeinsam versilbert (am besten nach BÖTTCHER, S. 373, ohne die Schale zu bewegen). Hierauf prüft man sie auf Planheit, zunächst indem man

[20]) K. BURNS, Journ. Opt. Soc. Amer. 7, 419. 1923.
[21]) H. KAHLER, Phys. Rev. 18, 210. 1921.

das auf einen weit entfernten Schirm (Zimmerdecke) reflektierte Bild der Sonne betrachtet, das nicht verzerrt sein darf. Diejenigen Spiegel, die gute Bilder geben, untersucht man dann mit Fernrohr und Skala.

Der Galvanometerspiegel steht beim Gebrauch im parallelen Strahlengang und wirkt daher als Aperturblende. Daraus folgt, daß er die Abbildung der Skala um so mehr verschlechtert, je kleiner er ist. Andererseits läßt sich zeigen, daß ein Instrument um so empfindlicher ist, je kleiner das Trägheitsmoment des aufgehängten Systems, also auch das des Spiegels ist. Die beiden Einflüsse wirken sich also entgegen. In einer interessanten Abhandlung hat VOLKMANN[23]) gezeigt, daß das Maximum der Empfindlichkeit erreicht wird, wenn der Spiegel den fünften Teil des gesamten Trägheitsmomentes ausmacht. Bei den berühmten Galvanometern von PASCHEN sowie von DU BOIS und RUBENS haben die Spiegel tatsächlich nahe die günstigste Größe. 20% Abweichung vom günstigsten Durchmesser gibt 10% Einbuße an Empfindlichkeit. Verdoppelung der zu $^1/_{30}$ des Durchmessers angenommenen Dicke des Spiegels gibt 13% weniger Empfindlichkeit. Auf möglichst geringes Trägheitsmoment der Fassung ist besonders zu achten. Am besten befestigt man das Spiegelchen mit einer Spur Klebwachs an der Achse.

Fünftes Kapitel.

Vakuumtechnik.

Die Anforderungen der Glühlampen-, Röntgenröhren- und Elektronenröhrenindustrie sowie die Arbeiten zahlreicher Physiker wie GAEDE, KNUDSEN, LANGMUIR, DUNOYER haben eine noch vor zwei Jahrzehnten unbekannte technische Beherrschung des Hochvakuums (10^{-9} Atmosphären) geschaffen. Es sei hier auf die Bücher von A. GOETZ „Physik und Technik des Hochvakuums"[1]), von L. DUNOYER „La technique du vide" (1924)[2]) und von DUSHMAN[3]) hingewiesen.

Die Vakuumpumpen und die Adsorption des Gases durch gekühlte Kohle sind in diesem Handbuch in dem Abschnitt von Herrn GAEDE behandelt, die Vakuummanometer von Herrn HOLBORN.

1. Die Vakuumleitung.

a) Rohrdurchmesser. Bei der Anlage der Leitung muß man bedenken, daß ihr Strömungswiderstand bei Drucken von 10^{-4} bis 10^{-6} mm

[23]) W. VOLKMANN, Phys. ZS. 12, 76. 1911.

[1]) Vieweg & Sohn, Braunschweig. 2. Auflage 1926.

[2]) Conférences-rapports de documentation sur la physique. Herausgegeben v. d. Ges. „Journal de physique", Paris 1924.

[3]) S. DUSHMAN, „Production and measurement of high vacuum". Schenectady.

Quecksilber ganz bedeutend größer ist, als bei Drucken von etwa 10^{-3} mm, wie sie z. B. für Kathodenstrahlröhren in Frage kommen. Während man in letzterem Fall Röhren von 6—8 mm Durchmesser verwenden kann, würde man beim Arbeiten mit extremem Hochvakuum die Leistung der besten Pumpe durch eine enge Leitung illusorisch machen. Diese muß hier möglichst kurz und möglichst weit sein, ihr Durchmesser soll wenigstens 20 mm betragen. Verengungen beeinträchtigen, auch wenn sie kurz sind, die Leistung der Pumpe merklich, daher sind große Hähne mit weiten Bohrungen (10 mm, vgl. auch Fig. 16) zu verwenden. Die Einschnürung an einer eventuellen Abschmelzstelle läßt sich leider nicht umgehen.

b) Ausfriertaschen Aus zwei Gründen ist es wünschenswert, den Quecksilberdampf der Pumpe, dessen Druck bei Zimmertemperatur etwa 0,001 mm (vgl. S. 340) beträgt, von dem evakuierten Rohr fernzuhalten · Einmal stellt er eine Verunreinigung des Gases dar, die z. B. bei spektroskopischen Arbeiten stört, zweitens kann man, wie GAEDE[3]) gezeigt hat, durch Kondensation des Quecksilbers in dem Rezipienten einen wesentlich tieferen Totaldruck erreichen als in der Pumpe selbst. Es ist daher üblich geworden, bei den meisten Vakuumarbeiten zwischen Pumpe und Rezipienten eine in flüssige Luft oder wenigstens Kohlensäureschnee-Alkoholmischung tauchende „Ausfriertasche" einzuschalten, die auch Wasser und organische Dämpfe zurückhält.

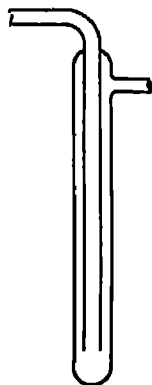
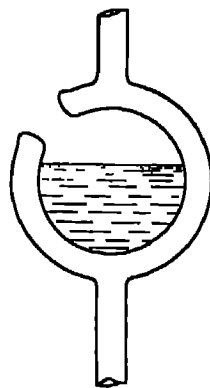



Fig. 14. Ausfriertasche.

Fig. 15. Ausfriertasche

Diese besteht entweder aus einem U-Rohr oder (Fig. 14, auch Fig. 6 und 13) aus einem 3—4 cm weitem Rohr, in das ein etwa 2 cm weites bis nahe zum Boden hineinragt. Einen noch geringeren Strömungswiderstand hat die von Hanff & Buest, Berlin, hergestellte Form Fig. 15. Die in die Höhlung eingegossene flüssige Luft hält sich allerdings nur bei gutem Vakuum einige Zeit, während das Modell Fig. 14, in eine mit flüssiger Luft gefüllte 2-Liter-Flasche eingeführt, mehrere Tage lang ohne Wartung Dienst tut.

Wichtig ist, daß frisch gereinigte Rohre, wenn sie nur mit Kohlensäureschnee gekühlt werden, den Quecksilberdampf nur unvollständig zurückhalten; es tritt hier offenbar ein Kondensationsverzug auf, der sich ver-

mutlich durch Versilbern oder durch Füllung mit Metallspänen behel ließe Hat sich dagegen erst ein feiner Quecksilberbelag gebildet, genügt auch die Kühlung mit Kohlensäureschnee-Alkoholmischu bei deren Temperatur (— 80°) der Dampfdruck des Quecksilbers et 10^{-7} mm beträgt Bei der Temperatur der flüssigen Luft (ca. — 19 ist sein Dampfdruck 10^{-27} mm, der des Wasserdampfes 10^{-16} mm.

Sehr vollkommen wird Quecksilberdampf auch zurückgehalten, we man in die Vakuumleitung ein Rohr einschaltet, das mit hineindes liertem Natrium oder Kalium beschickt ist. Kalium absorbiert an Que silber das 1½fache seines Gewichtes[4]).

c) Schliffe, Hähne und Quecksilberverschlüsse. Wie ol hervorgehoben, müssen für Hochvakuumarbeiten die Bohrungen Hähne möglichst weit sein. Das bedingt s große Hähne. Die käuflichen Modelle sind meist zu klein. Recht empfehlenswert sind Hähne Form Fig. 16, bei denen aber (im Gegensatz zu Hähnen gewöhnlicher Art) das Küken durch Atmosphärendruck allmählich festgepreßt werden pflegt. Der gefettete Hahn oder Sch muß glasklar durchsichtig erscheinen; feine, durchsichtige Streifen geben voraussichtlich Undichtigkeit Veranlassung. Wenn kräftiges drücken und Drehen nicht hilft, schleift man Hahn am besten nach. Dazu befreit man ihn du Abwischen mit Benzol oder Spiritus vom größ Teil des Fettes, befeuchtet ihn mit einem dün Brei von feinkörnigem „Polierschmirgel" Wasser und reibt ihn mit mäßigem Druck ein (vgl. S. 368). Bei Schlif läßt man zunächst die inneren 3—5 mm ungefettet, damit das Fett nicht bei längerem Gebrauch in das Rohr hinein vordrückt.

Fig. 16. Vakuumhahn mit weiter Bohrung.

Große Anforderungen werden an das verwendete Hahnfett gestc das außer guter Schmierfähigkeit auch einen möglichst niedrigen Dan druck besitzen muß. Rezepte von Hahnfetten sind in den „Technisc Kunstgriffen" (l. c. Fußnote S. 347) angegeben. Das beliebteste ist Gummifett von RAMSAY, das von Leybolds Nachfolger in Köln, Lautenschläger in München u. a. bezogen werden kann. Es besteht reinem, nicht vulkanisiertem, entsandetem Rohgummi („Parafe Bezugsquelle z. B. Hochenleitner, Metzelers Nachf., München), weiß Vaseline und Paraffin. Man schmilzt 2 Teile Vaseline und 0,5—1

Paraffin in einer Porzellanschale auf dem Wasserbad bei ca. 100°, gibt 1—2 Teile des in kleine Schnitzel geschnittenen Gummis hinein, erhitzt einige Stunden, bis der Gummi mazeriert ist, und fügt allmählich mehr, im ganzen 4 Teile, Gummischnitzel hinzu. Nach mehreren Stunden ist eine homogene, bei Zimmertemperatur fadenziehende Lösung entstanden. Die Konsistenz des Fettes kann man durch Paraffinzusatz (bis zu 2 Teilen im ganzen) nach Wunsch vermehren oder durch Vaseline vermindern. DUNOYER filtriert das geschmolzene Fett und läßt es im Vakuum 24 Stunden bei 40° evtl. vorhandene flüchtige Bestandteile abgeben. Nach WOODROW[5]) ist der Dampfdruck des Gummifettes etwa 10^{-4} mm, bei DUNOYER findet sich die Angabe, daß sich bei seiner Benutzung leicht Drucke von 10^{-5} bis 10^{-6} mm Hg erreichen lassen.

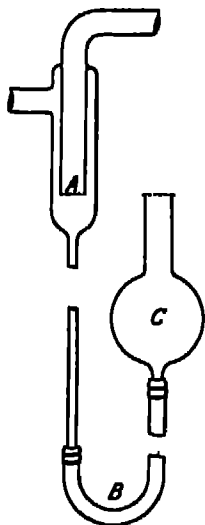



Fig. 17. Quecksilberverschluß.

Trotzdem ist ein gefetteter Hahn mit seiner meist zu engen Bohrung, seiner Neigung zum gelegentlichen Undichtwerden, seinem organischen Fett gewissermaßen nur ein Notbehelf. Viele Physiker bevorzugen daher (bei Hochvakuumarbeiten!) Quecksilberverschlüsse von der Form Fig. 17, welche die Vorzüge der modernen Kondensationspumpen erst richtig hervortreten lassen, die aber nur Druckunterschiede von höchstens einigen Zentimetern absperren. Die Öffnung A wird durch Quecksilber verschlossen, das beim Heben des Gefäßes C durch den Schlauch B fließt. Der Flüssigkeitsspiegel steht in A um Barometerhöhe höher als in C.

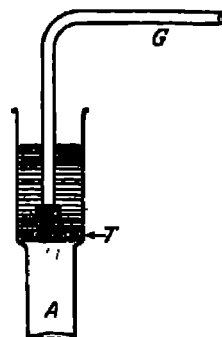



Fig. 18. Prytzverschluß.

Prytzverschluß. Auf originelle Weise hat PRYTZ[6]) den Einbau eines Hahnes, speziell eines solchen, der die Vakuumleitung mit der Atmosphäre verbindet, umgangen. In Fig. 18 ist T ein eingekittetes Tonplättchen, welches das Lumen des Glasrohres A vollständig verschließt. Überschichtet man das Plättchen mit Quecksilber, so schließt das Ventil in der Richtung von oben (Atmosphäre) nach unten (Vakuum) vollkommen gasdicht. Bringt man aber ein zweites, engeres Rohr G, dessen Mündung mit einem ähnlichen Plättchen verschlossen ist, durch das Quecksilber hindurch zur Berührung mit T, so dringt das in G ent-

[5]) J. W. WOODROW, Phys. ZS 15, 868. 1914.

haltene Gas durch die Poren der beiden Plättchen in das Vakuum. Dieses Prinzip findet z. B. im „Bauerventil" zur Regenerierung von Röntgenröhren Anwendung. PRYTZ hebt hervor, daß man auf diese Weise mittels eines kleinen, auf ein Glasstäbchen gekitteten Tonkügelchens schrittweise immer genau dieselbe winzige Gasmenge in das Vakuum einführen kann, ebenso läßt sich ein mit dem Prytzverschluß ausgerüstetes Barometer, falls sich im Laufe der Jahre sein Vakuum verschlechtert hat, durch den Verschluß hindurch auspumpen usw. Die Poren der Platten sollen natürlich so groß sein, daß sie eben noch mit Sicherheit Quecksilber zurückhalten; trotzdem haben diese Verschlüsse für Hochvakuumarbeiten einen noch viel zu großen Widerstand. Als poröse Masse geeignet ist Schamotte (PRYTZ), ein Erzeugnis der Berliner Porzellanmanufaktur [STOCK[7]] und vermutlich eine neuerdings von Schott & Gen., Jena, hergestellte Masse aus gesintertem Glas, die für chemische Filter als Platte in Glasgefäße eingeschmolzen, ähnlich wie

Fig. 19. Biegsames Tombakrohr.

Fig. 16 geliefert wird[8]). Die Verwendung des Prytzverschlusses an einem Vorratsgefäß für Helium ist in den „Technischen Kunstgriffen" (l. c. Fußnote S. 347) beschrieben.

d) Biegsame Verbindungen. Wenn irgend möglich, soll die Vakuumleitung ganz aus miteinander verblasenen Glasrohren bestehen. Das Verblasen einzelner Stücke läßt sich mit dem Handgebläse (S. 365) ohne Schwierigkeit ausführen. Ist eine gewisse Beweglichkeit des Rezipienten gegen die Pumpe nötig, so hat man folgende Möglichkeiten:

Die „KUNDTsche Feder", ein langes, dünnes Glasrohr (6 mm Durchm.) mit zwei senkrecht zueinander stehenden U-förmigen Biegungen von je 20—30 cm Länge. Das Glas federt so weit, daß man das eine Ende der Feder um 2—5 cm gegen das andere verschieben kann. Ihr Vorzug ist die saubere, dichte Glasoberfläche, ihr Nachteil der hohe Strömungswiderstand, der sie für Drucke unter 0,001 mm geradezu unbrauchbar macht.

Das „biegsame Tombakrohr" der Waffen- und Munitionsfabrik Karlsruhe (Fig. 19). Diese Rohre, die in verschiedensten Durchmessern geliefert werden, sind dank einer schraubenförmigen, tief eingedrückten

[7]) A. STOCK, Phys. ZS. 18. 103. 1917. Verh. d. D. Phys. Ges. 10. 10. 1908

Nut gut flexibel, besonders wenn man sie vor Gebrauch ausglüht. Ihre Dichtigkeit dürfte den meisten Anforderungen genügen; eine größere Metalloberfläche im Vakuum, die nicht ausgeheizt werden kann, wird ja immer durch Gasabgabe stören. Jedenfalls sind die Rohre viel besser als das früher oft verwendete schwere Bleirohr.

„Vakuumschlauch“ Den unter diesem Namen erhältlichen dickwandigen Gummischlauch benutzte man vorzugsweise zur Verbindung von Vor- und Hauptpumpe. Für „bessere“ Vakuumarbeiten schien er ungeeignet. DUNOYER weist jedoch darauf hin, daß man auch bei Einschaltung eines kurzen Stückes Gummischlauch ein recht gutes Vakuum erhalten kann, wenn man ihn richtig vorbehandelt. Man verwendet Gummi, der so wenig Schwefel als möglich enthält, kocht den Schlauch mehrere Stunden erst in Sodalösung und dann in destilliertem Wasser aus und trocknet ihn staubfrei. Das abgegebene Gas besteht größtenteils aus Wasserstoff, so daß man, wie DUNOYER sagt, durch Einschluß eines kleinen Stückchens Gummi in ein Geißlerrohr ein schönes Spektrum der Balmerlinien bekommt. — Der Schlauch wird meist nach einiger Zeit porös, dies läßt sich verhindern, wenn man ihn außen mit Rizinusöl bestreicht.

e) Kittungen. Als Kitte kommen vorzugsweise Picein und weißer Siegellack, auch Khotinskycement in Betracht Die Herstellung von Kittungen wurde auf S. 356 beschrieben. DUNOYER schreibt mit Recht, daß wohl noch nie systematische Studien über die Eignung verschiedener Kitte für die Vakuumtechnik, über ihre Dampfspannung und die Möglichkeit, diese durch längeres Erhitzen im Vakuum herabzusetzen, angestellt worden sind. Der niedrige Schmelzpunkt dieser Kitte wird oft als großer Nachteil empfunden. Der erst bei 455° schmelzende Chlorsilberkitt (vgl. S. 357) dagegen läßt häufig beim Erkalten das Glas springen.

Metallgefäße, die bekanntlich zur Undichtigkeit neigen, überzieht man vorteilhaft auf der Außenseite mit Emaille- oder Zaponlack, während innen Atmosphärendruck herrscht; erst nach gründlichem Trocknen des Anstriches soll man evakuieren. Bakelit ist nach DUNOYER hierfür weniger geeignet.

2. Herstellung von Glühkathoden.

Die Gesetze der Elektronenemission von glühenden Oberflächen sind an anderer Stelle dieses Handbuches bearbeitet. Durch die Entwicklung der drahtlosen Telegraphie wurden zahlreiche Arbeiten angeregt, mit dem Ziel, möglichst wirksame und möglichst dauerhafte Glühkathoden ausfindig zu machen. Der Physiker muß zudem unter Umständen ver-

nicht durch den Potentialabfall längs des Glühdrahtes gestört sowie, daß dessen Metall durch das Füllgas nicht angegriffen wird.

a) Wolfram. Nach FORSYTHE und WORTHING[9]) ist die Elektronenemmission von Wolfram bei den Temperaturen

2000	2400	2800 Grad absolut
0,00089	0,102	3,21 Amp./cm²,

also bei den höchsten Temperaturen größer als bei allen anderen Materialien. Seine Empfindlichkeit gegen Wasserdampf wurde auf S. 337 beschrieben; gegen sehr trockenen Sauerstoff, Jod- und Salzsäuredampf ist es einigermaßen beständig. Meist wickelt man den Draht um einen feinen Dorn (Stahlnadel) zu einer kleinen Spirale; das SIEGBAHNsche Verfahren zur Herstellung flacher Spiralen[10]) ist auch in den „Technischen Kunstgriffen" (l. c. Fußnote S 347) beschrieben. Die von DUSHMAN[11]) eingeführte „thermionische Werkfunktion" (d. i. die pro Elektron und für die absolute Temperatur 0 berechnete Austrittsarbeit) ist für Wolfram 4,5 Volt.

b) Thoriertes Wolfram Thorium gibt bei 1500° abs. etwa 100 000 mal so viele Elektronen ab wie Wolfram bei gleicher Temperatur. Drähte aus Thorium pflegt man jedoch nicht anzuwenden, wohl aber mit einer molekularen Thoriumschicht überzogene Wolframdrähte. Der im Handel erhältliche „thorierte Wolframdraht" besteht aus Wolfram mit einem Zusatz von einigen Prozent Thoriumoxyd, das durch Erhitzen auf Weißglut reduziert wird und als Metall an die Drahtoberfläche diffundiert. Um den Draht zu aktivieren, erhitzt man ihn etwa 5 Sekunden lang auf ca. 2700° abs., hierauf längere Zeit auf 2000° abs. Die Gebrauchstemperatur ist 1500—1800° abs., bei 2000° abs. beginnt der Abbau der Schicht. Die „Werkfunktion" von Thorium ist 2,94 Volt.

c) Oxydkathoden. Die starke Elektronenemission glühender Erdalkalioxyde wurde bekanntlich schon 1904 von WEHNELT entdeckt. Den Oxydüberzug kann man erzeugen, indem man die fertig montierte, aber aus dem Rohr herausgenommene Kathode (auf ihrer Vorderfläche) mit einer konzentrierten Lösung von Calcium-, Barium- und Strontiumnitrat bestreicht und die Elektrode (an freier Luft) vorsichtig durch Strom heizt. Zuerst trocknet die Lösung ein, dann schmelzen die Salze in ihrem Kristallwasser, dieses verdampft, es entweichen nitrose Dämpfe, und bei schwachem Glühen erscheint ein Überzug von Oxyd. Es ist ein alter Kunstgriff, einen gut haftenden und emittierenden Überzug von Calciumoxyd dadurch herzustellen, daß man die glühende Kathodenoberfläche einen Augenblick lang (!) mit einem Stück weißen Siegel-

[9]) W. E. FORSYTHE und A. G. WORTHING, Astrophys. Journ. 61, 146. 1925.
[10]) M. SIEGBAHN Jahrb. d. Radioakt. u. Elektr 18, 257 1922

lackes berührt. Besonders empfehlenswert ist dieses Verfahren, wenn man eine möglichst punktförmige Elektronenquelle — scharf begrenzte Kathodenstrahlen — benötigt. Die Kathode besteht in diesem Fall meist aus einem Streifchen Platinfolie von 3—5 mm Breite und 0,01—0,002 mm Dicke. Ein feiner „Faden" von Siegellack wird (einige Millimeter lang) an ein Streichholz gekittet und der kleine Fleck wie oben erzeugt. — Der Träger der Oxydschicht kann aus Platin, Wolfram, Chromnickel, auch Kohle (Streifen aus einer Mikrophonmembran) bestehen.

Über neuere Erfahrungen der „amerikanischen Telephon- und Telegraphcompany und Western Electric Company" bei der fabrikmäßigen Herstellung großer Mengen von Glühkathodenröhren mit Oxydkathode berichtet ARNOLD[18]). Nach diesen Versuchen haftet die Schicht am besten auf einer Legierung von Platin mit ca. 6% Iridium (durch Bildung einer chemischen Verbindung). Die glühelektrische Aktivität fällt von Barium über Strontium nach Calcium. Da sich Bariumoxyd allmählich zersetzt, wird eine Mischung von BaO und SrO bevorzugt. Die fein gepulverten Carbonate werden in geschmolzenem Paraffin aufgeschwemmt und aus der Mischung nach dem Erstarren Stäbchen geformt. Man bestreicht den erwärmten Draht und erhitzt ihn dann momentan auf ca. 1000°, um die organische Substanz zu zerstören. Auf 4 Lagen SrO folgen 4 Lagen BaO, dann 4 SrO, zuletzt 4 BaO. Hierauf erhitzt man den Draht 2 Stunden lang auf 1200°. Der Belag haftet dann sehr fest, hat eine Dicke von 2—3 mg pro Quadratmeter und besitzt bis zu 20 000 Stunden Lebensdauer. (Die Masse der Elektronen, die er in dieser Zeit emittiert, ist 15mal so groß wie die der Oxydschicht.) — Die „Werkfunktion" ist für BaO 1,7, für CaO 3,6 Volt.

Die Kathoden müssen vor Feuchtigkeit und Kohlensäure geschützt und nach dem Einbau zunächst kurze Zeit mit stärkerem Strom geheizt werden. Spuren von Sauerstoff in der Vakuumröhre setzen die Emission stark herab, Wasserstoff kann sie anregen.

Nach Versuchen von DAVISSON[19]) schlägt sich verdampftes Oxyd auf einem benachbarten Draht spurenweise nieder: auch wenn nun die Menge noch nicht einmal hinreicht, die Oberfläche mit einer Schicht von 1 Molekül Dicke zu überziehen, ist die Elektronenemission des zweiten Drahtes der des ersten fast gleich.

d) Cäsiumschichten. Metallisches Cäsium in einem Vakuumrohr destilliert schon bei 30° merklich und überzieht die Oberfläche mit einer

[18]) H. D. ARNOLD, Phys. Rev. 16, 70. 1920. Referate im Jahrb. d. drahtl. Tel. 16, 458. 1920 und Phys. Ber. 5, 692. 1924.

atomaren Schicht LANGMUIR[14]) fand, daß diese Schicht schon bei Temperaturen von wenigen hundert Grad, wo sie noch nicht verdampft, kräftig Elektronen emittiert. Die Emission kann auf das 3000fache gesteigert werden, wenn man als Unterlage einen besonders vorbehandelten Wolframdraht verwendet· Man glüht ihn zunächst bei 2700° abs. einige Zeit aus, läßt Sauerstoff von 0,02 mm Druck ein und glüht den Draht einige Sekunden bei 1000° abs Hierauf wird evakuiert, Cäsium in das Vakuumrohr eindestilliert (vgl. S 344) und der Draht bei 1200—1000° geglüht. Bei einer Gefäßtemperatur von 25—30° erhält man das Optimum von 350 Milliamp /cm² bei Kathodentemperaturen von 500—600° C Bei höheren Temperaturen verdampft die Schicht — Cäsium besitzt mit 1,34 Volt von allen Substanzen die niedrigste „Werkfunktion".

Wenn — bei der Messung der Geschwindigkeit der Glühelektronen — der Potentialabfall auf dem Heizdraht stört, so umgibt man ihn mit einem Zylinder aus Molybdän-, Platin- oder Nickelblech. Oder man verwendet (nach HERTZ) ein oxydüberzogenes Streifchen Platinfolie mit zwei gegenüberliegenden Einschnitten, die durch die Zusammendrängung der Strombahnen eine eng begrenzte Erhitzung bewirken.

3. Das Evakuieren.

Trotz der großen Leistungsfähigkeit der modernen Pumpen kann man extrem hohe Vakua nur bei Beachtung gewisser Vorschriften erreichen. Ebenso erfordert die Füllung von Entladungsröhren mit reinen Gasen eine durch Erfahrung ausgebildete Technik.

Früher spielte die Reinigung der Röhren eine große Rolle. Man benutzt dazu vorteilhaft wie beim Versilbern (vgl. S 370) zuerst Kalioder Natronlauge, die Aluminiumelektroden angreift (blank beizt), hierauf Chromschwefelsäure (womöglich heiß) oder Salpetersäure. Ein gutes Reinigungsmittel ist 1—2 proz. Flußsäure, die aber, da sie das Glas angreift, nur wenige Minuten einwirken darf. — Nach neueren Erfahrungen läßt sich jedoch anscheinend die Güte des durch Ausheizen usw. erreichbaren Hochvakuums durch derartige Reinigung nicht merklich verbessern.

a) Die Kühlung Der Einbau von Ausfriertaschen in die Vakuumleitung wurde schon oben (S. 385) besprochen, ebenso die bedeutende Erhöhung ihrer Wirksamkeit durch einen Hauch von sublimiertem Quecksilber. Bei Verwendung von Kondensationspumpen gelangen — trotz ihrer Kühlung mit sehr kaltem Leitungswasser — erhebliche Mengen Quecksilberdampf in das Entladungsrohr, welche durch Amalgamierung der Aluminiumelektroden sehr schädlich sein können. Bewahrt man

[14]) L. LANGMUIR und KINGDON, Science 57, 58, [illegible]

nämlich das Entladungsrohr (nach Beendigung der Versuche) luftgefüllt auf, so oxydiert sich das durch das Quecksilber freigelegte Aluminium zu pulverförmiger, grauer Tonerde, während das Quecksilber weitere Teile der Elektrode amalgamiert, bis nach einigen Wochen ein Häufchen Tonerde sich gebildet hat. Ein Mittel gegen diese „Elektrodenkrankheit" ist kräftiges Ausheizen unter Durchspülung von Luft.

Obwohl der Druck des Wasserdampfes bei der Temperatur der flüssigen Luft, wie erwähnt, nur 10^{-16} mm ist, erhält man ein unzureichendes Hochvakuum, wenn sich in der Ausfriertasche Spuren von Eis gebildet haben. Es ist deshalb fehlerhaft, die Kühlung anzubringen, solange sich die Vakuumleitung noch unter Atmosphärendruck befindet. Steht zur Kühlung nur Kohlensäureschnee-Alkoholmischung zur Verfügung, so muß man den Wasserdampf durch Phosphorsäureanhydrid entfernen, da bei der Temperatur von ca. — 80° sein Dampfdruck noch 10^{-3} mm beträgt.

Das Phosphorsäureanhydrid (Phosphorpentoxyd, P_2O_5), ein weißes Pulver, ist das stärkste bekannte Trockenmittel. Es soll frei von niederen Oxyden sein und beim Zerlaufen keine braunroten Klümpchen hinterlassen (was häufig der Fall ist!). Man kann es reinigen, indem man es in eine glühende Porzellanschale bringt, einen Sauerstoffstrom einleitet und umrührt. Zum Einfüllen bereitet man eine Papierunterlage vor, ferner einen Trichter und ein Stäbchen zum Durchstoßen des Trichterhalses und erwärmt letztere, um sie von der anhaftenden Wasserhaut zu befreien. Das Einfüllen muß möglichst rasch geschehen, da das Phosphorpentoxyd sehr schnell zu adhärieren beginnt. — Das P_2O_5 trocknet auch noch kräftig, wenn es bereits feucht aussieht. Mit Wasser zusammengebracht, erhitzt es sich sehr stark. Man muß deshalb bei der Reinigung des Trockengefäßes vorsichtig sein. Vorteilhaft verwendet man dazu kleine Mengen von technischem (96 proz.) Alkohol, um dem Phosphorpentoxyd das Wasser gewissermaßen stark verdünnt zuzuführen.

b) Das Ausheizen. Schon HITTORF wußte, daß man stärkere Luftverdünnungen erhält, wenn man das Entladungsrohr stark erhitzt, während die Pumpe arbeitet. Sowohl Glas als insbesondere Metall enthält große Mengen okkludierte Gase, letzteres besonders Kohlenmonoxyd, ersteres Wasserdampf und Kohlendioxyd. Die Anforderungen der Technik haben in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen über diese Materie veranlaßt[15]), denen DUNOYER mehrere Seiten seines erwähnten Buches widmet. Ein Zahlenbeispiel für die allmähliche Abgabe des Wasserdampfes von einer Glasoberfläche von Zimmertempe-

ratur sei angeführt · Ein Rezipient von 9 l wurde auf 10^{-4} mm evakuiert. Nach 10 Stunden war der Druck auf 10^{-1} mm, also auf das Tausendfache, gestiegen. Bei Röhren mit größeren Metallteilen kann diese Gasabgabe monatelang verfolgt werden. Besonders bei Spektraluntersuchungen darf man diese Fehlerquelle, die natürlich eine starke prozentuale Verunreinigung des eingefüllten Gases bewirkt, nicht außer acht lassen. Es treten in diesem Falle außer den Balmerlinien des Wasserstoffes die grünen Banden des Swanschen Spektrums bei 5635, 5585, 5541 sowie bei 5165 und 5129 Å.-E. auf, und zwar unter Umständen mit solcher Hartnäckigkeit, daß Piazzi Smyth (1887) vermutete, sie rührten von der Gummiisolation der Zuführungsdrähte her!

Bei erhöhter Temperatur erfolgt die Gasabgabe wesentlich rascher; und daraus folgt für die Praxis, daß es nötig ist, die Röhren „auszuheizen". Da das evakuierte, gewöhnliche Geräteglas höchstens 400 bis 450° aushält, ohne sich zu deformieren, und da diese Temperatur mehrere Stunden aufrechterhalten werden muß, verwendet man am besten elektrische Öfen, die sich hierfür leicht aus einem mit Eisendraht bewickelten Asbestrohr herstellen lassen. Noch viel hartnäckiger als von Glas werden die Gase von Metallen festgehalten. Je länger und je höher man sie erhitzt, desto gründlicher entfernt man die großen Mengen von Gasen. Der sicherste Weg, das Metall im Vakuum zu schmelzen, ist in der Regel (bei fertigen Elektroden) nicht gangbar. Wohl aber kann man die Elektroden häufig durch Joulesche Wärme, durch Elektronenbombardement oder durch Wirbelstromheizung ausglühen. Vielfach heizt man sie auch vor dem Einbau in einem mit einer stark wirkenden Pumpe verbundenen Porzellan- oder Quarzrohr mehrere Stunden bei heller Rotglut aus (Aluminium schmilzt schon bei dunkler Rotglut!). Von großer Bedeutung dürften die von der „Vakuumschmelze W. C. Heraeus in Hanau a. M." hergestellten vakuumgeschmolzenen Metalle (Aluminium, Nickel, Kupfer u. a.) werden. Die Luft, die diese Metalle beim Lagern okkludieren, läßt sich viel leichter vertreiben als die bei ihrer Verhüttung aufgenommenen Gase.

Wenn einigermaßen saubere Vakuumbedingungen verlangt sind, empfehlen wir folgenden Arbeitsgang: Man beginnt morgens mit dem Pumpen und schaltet gleichzeitig den elektrischen Ofen ein, der etwa 400° erzeugt. Etwa eine Viertelstunde später kommt die Ausfriertasche in flüssige Luft. Man läßt die Pumpe tagsüber arbeiten, stellt sie, nicht aber den Ofen, abends ab. Am nächsten Tag pumpt man bis zum Abend weiter, erwärmt gelegentlich die Glasvakuumleitung mit der flatternden Bunsenbrennerflamme und stellt abends den Ofen ab. Der

4. Das Aufsuchen einer Undichtigkeit.

Nicht selten wird eine Undichtigkeit durch starke Gasabgabe (z. B. von Kokoskohle) vorgetäuscht. Besitzt die Apparatur einige Hähne oder Quecksilberverschlüsse, so schließt man diese um festzustellen, in welchem Teil die Druckzunahme statthat Im allgemeinen ist die Wahrscheinlichkeit am größten, daß eine Kittung undicht ist; nach abnehmender Wahrscheinlichkeit geordnet folgen: Hähne und Schliffe, Einschmelzstellen, Poren im Glas Letztere können z B. beim Arbeiten mit Teslaentladungen auftreten. Um sie aufzufinden, empfiehlt DUNOYER folgenden Kunstgriff: Von einem kleinen Induktor, der 7—8 mm Funkenlänge gibt, verbindet man den einen Sekundärpol metallisch mit dem Gas in der Vakuumleitung (indem man ihn an die Pumpe, das Quecksilbermanometer oder eine Elektrode legt); den anderen mit einem Pinsel aus dünnen Drähten. Mit diesem fährt man (nachdem man das Zimmer verdunkelt hat) an der Vakuumleitung entlang, die Gas von 1—2 Zehntel Millimeter Druck enthalten soll. Im allgemeinen beobachtet man dann eine schwach leuchtende Büschelentladung. Befindet sich aber der Pinsel in nächster Nähe der „Pore", so schlagen durch diese kleine Fünkchen von großer Flächenhelligkeit. Nach Einlassen von Luft (Atmosphärendruck) wird die Stelle durch ein aufgeschmolzenes Glaströpfchen verschlossen. Für einen Kanal längs eines Einschmelzdrahtes ist die Methode natürlich nicht brauchbar; ebensowenig für undichte Stellen in Metall. Auch bei Schliffen versagt sie, wenn der zu durchschlagende Kanal größer ist als die Funkenstrecke in Luft,

In vielen Fällen wird die Pumpe eben noch einen Druck ähnlich wie in Geißlerröhren aufrechterhalten können, und die Entladung in einem Teströhrchen zeigt dann die für Luft charakteristische Farbe: braunrote positive Säule, kornblumenblaues Licht an der Kathode. Benetzt man nun die undichte Stelle mit Wasser oder Alkohol, so schlägt die Farbe der Entladung momentan in ein fahles Grau um. Diese Methode ist sicher und immer anwendbar, nur dauert es manchmal ziemlich lange, vielleicht $^1/_2$ Minute, bis die Flüssigkeit eingedrungen ist.

Außerdem kann man versuchen, mittels einer Fahrradpumpe inneren Überdruck zu erzeugen und, ähnlich wie bei einer Pneumatikreparatur, das Loch durch Eintauchen der Apparatur in Wasser oder durch Aufstreichen von Seifenlösung ausfindig zu machen.

Ein Hahn oder Schliff, der tadellos glasklar durchsichtig erscheint, ist mit Sicherheit dicht. Zeigt er Schlieren, so muß er neu gefettet oder evtl. nachgeschliffen werden (vgl. S. 386).

Ein vorzügliches Mittel zur Beseitigung einer Undichtigkeit ist, alle

lösung oder mit Zaponlack zu überziehen. Noch sicherer dichtet möglichst heiß aufgestrichener Wachskolophoniumkitt, der allerdings schon bei mäßiger Erwärmung schmilzt. Leider halten die überstrichenen Stellen höchstens (bei Zaponlack) 150° aus.

5. Füllung von Spektralröhren.

Spektralröhren, die abgeschmolzen werden sollen, müssen unbedingt in der vorstehend angegebenen Weise ausgeheizt werden, wenn man nicht Gefahr laufen will, daß sich das Spektrum nach kurzem Gebrauch durch die freigewordenen Gase ändert. Es empfiehlt sich hier, die Reinigung dadurch zu unterstützen, daß man zu wiederholten Malen etwas von dem Füllgas einläßt, das Rohr einige Zeit möglichst kräftig betreibt und dann das Gas wieder abpumpt. Namhafte Physiker empfehlen, zu dieser Reinigung Sauerstoff zu verwenden Beim Abschmelzen wähle man den Gasdruck möglichst hoch — so daß das Rohr noch gut leuchtet —, da sich bekanntlich die Röhren im Betrieb selbst evakuieren.

Viel leichter sind die Anforderungen an die Reinheit des Rohres bei der (wohl zuerst von W. WIEN angegebenen) Durchströmungsmethode zu erfüllen, denn das dauernd strömende Gas spült hier alle freiwerdenden Verunreinigungen mit fort.

Die Herstellung reiner Gase ist in dem bekannten Buch von TRAVERS[16]) und vor allem in der neueren Monographie von MOSER[17]) beschrieben. In den früher (l c. Fußnote S. 347) zitierten „Technischen Kunstgriffen" sind die spektroskopisch wichtigen Gase ausgewählt, und zwar wurden diejenigen Methoden (meist nach MOSER) angegeben, die möglichst reines Gas liefern, wenn auch nur in geringer Menge. Wir folgen hier ziemlich nahe der dort gegebenen Darstellung.

a) Wasserstoff. Für spektroskopische Zwecke sind besonders zwei physikalische Herstellungsmethoden empfehlenswert:

Durch Palladiumblech diffundieren bei Rotglut ganz ansehnliche Mengen Wasserstoff. Herdeus, Gundelach und andere Firmen bringen kleine Palladiumröhrchen in Handel, die am einen Ende hart zugelötet, am anderen in ein Glasröhrchen eingeschmolzen sind. Man schmilzt das Glasrohr an die Apparatur an und hat dann nur nötig, das Metallröhrchen mit einer Gas- oder besser Weingeistflamme zum Glühen zu erhitzen, um den in der Flamme vorhandenen freien Wasserstoff in das Innere diffundieren zu lassen. Die Vorrichtung, als „Osmoregenerierung"

---

[16]) M. W. TRAVERS, „Experimentelle Untersuchung von Gasen". Deutsch von T. ESTREICHER. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1905.

von Röntgenröhren bekannt, ist absolut dicht und liefert kleine, aber meist genügende Mengen chemisch reinen Gases.

Ferner adsorbiert bekanntlich Palladium bei Zimmertemperatur etwa das Tausendfache seines Volumens Wasserstoff von Atmosphärendruck. Um diese Eigenschaft zu verwenden, belädt man ein Streifchen Palladiumblech mit Wasserstoff, indem man es als Kathode in ein Becherglas bringt, das mit einem stark verdünnten Elektrolyten (Phosphorsäure) gefüllt wird. Man elektrolysiert mit schwachem Strom längere Zeit (über Nacht), reibt dann das Blech mit Filtrierpapier sauber, schmilzt es in einen Ansatz der Apparatur ein und evakuiert. Beim Erwärmen auf 100 bis 200° werden dann erhebliche Mengen von Wasserstoff frei, der gleichfalls vollkommen frei von allen Verunreinigungen ist.

Es möge erwähnt werden, daß dieser absolut trockene Wasserstoff bekanntlich die Balmerserie nicht so intensiv emittiert als etwas feuchtes Gas. Sehr schön erhält man die Balmerlinien, wenn man zur Füllung gar keinen Wasserstoff verwendet, sondern nur etwas Wasserdampf!

Fig. 20. Wasserstoffentwicklungsapparat nach GAEDE

Größere Mengen Gas liefert die Elektrolyse einer 30 proz. Natronlauge zwischen Nickelelektroden. Außer Wasserdampf enthält das Gas nur noch Spuren von Sauerstoff, der von der Anode her verschleppt wird. Dies kann man nach GAEDE[18]) dadurch umgehen, daß man in den Flüssigkeitsweg zwischen den eigentlichen Elektroden eine „Spülelektrode" S einschaltet (Fig. 20). Die von dieser aufsteigenden Wasserstoffbläschen waschen den Sauerstoff aus dem Elektrolyten heraus. Der negative Pol der Stromquelle führt, wie gezeichnet, zu der Mitte eines Widerstandes p q, mit dessen Enden die beiden Kathoden K und S verbunden sind. p und q müssen wesentlich größer sein als die Widerstände des Elektrolyten; bei Benutzung der Lichtleitung verwendet man zweckmäßig zwei Glühlampen. Die Anode A ist direkt mit der Stromquelle

verbunden. Gut bewährt hat sich ein selbstgefertigter Entwicklungsapparat aus zwei übereinander angeordneten, durch ein Steigrohr verbundenen WULFFschen Flaschen, bei dem der in der unteren Flasche sich entwickelnde Wasserstoff den Elektrolyten in die obere Flasche drängt, bis unten die Kathode aus der Flüssigkeit herausragt und dadurch der Strom automatisch unterbrochen wird.

Wasserstoff, der durch Einwirkung von Kalilauge auf Aluminium gewonnen wurde, ist nur bei sehr reinem Ausgangsmaterial rein.

Ein wohl noch nicht begangener Weg besteht in der Benutzung der erheblichen Durchlässigkeit von glühendem Quarzglas für Wasserstoff (vgl. S. 347).

b) Sauerstoff. Sehr reinen Sauerstoff erhält man durch Elektrolyse mit dem vorstehend angegebenen Apparat (wenn man die Stromrichtung umkehrt; der Sauerstoff entwickelt sich bekanntlich an der Anode!)

Von den bei MOSER angegebenen Rezepten scheinen die folgenden am besten zu sein: Man siebt Kaliumpermanganat und bringt die größeren, auf dem Sieb zurückbleibenden Kristalle in ein einseitig verschlossenes Glasrohr von 10—14 mm Durchmesser. Erwärmt man die Kristalle, so spalten sie Sauerstoff ab, der nur durch etwas Staub und Kohlendioxyd verunreinigt ist. Ersterer wird durch vorgelegte Asbestwolle, letzteres durch festes Ätzkali beseitigt. Der Sauerstoff ist dann vollkommen rein.

Tropft man eine Mischung von 1 L 3 proz. Wasserstoffsuperoxyd mit 150 ccm Schwefelsäure (mittels eines Tropftrichters) auf kristallisiertes Kaliumbichromat, so entwickelt sich Sauerstoff, der außer Wasserdampf nur Spuren von Kohlendioxyd enthält, die wie oben quantitativ beseitigt werden können.

c) Stickstoff. Dieses Gas konnte früher nur durch komplizierte Reinigungsverfahren frei von Beimengungen erhalten werden. TIEDE[19]) gab jedoch eine elegante Methode an, um „absolut reinen Stickstoff" zu erhalten. Man erhitzt dazu 1—2 g Kalium- oder Natriumazid (KAHLBAUM) in einem einseitig geschlossenen Rohr vorsichtig auf 320°. Die Reaktion verläuft sehr stürmisch und geht auch nach Abstellen der Heizung weiter. Daher bettet man das Rohr am besten in ein Sandbad ein oder verwendet einen elektrischen Ofen.

d) Chlor. Nach TRAVERS (l. c.) erhält man reinstes Chlor, allerdings nur in kleinen Mengen, durch Erhitzen von Goldchlorid im Vakuum. — Auch durch Einwirkung von konzentrierter, reiner Salzsäure auf Braunstein erhält man sehr reines Gas. Der Braunstein (Mangandioxyd)

wird kurze Zeit in Salpetersäure ausgekocht, mehrmals mit kochendem Wasser ausgewaschen und bei 100—120° getrocknet. Hierauf gibt man tropfenweise Salzsäure hinzu. Eine Anordnung, um durch Elektrolyse von geschmolzenem Chlorsilber große Mengen von absolut reinem und trockenem Chlor zu erhalten, ist bei MOSER (l. c.) beschrieben. Man hält 500 g Chlorsilber 5 Stunden lang in einem Tiegel geschmolzen, um ihm alle Feuchtigkeit zu entziehen. Das wieder erkaltete und in kleine Stücke zerschlagene „Hornsilber" füllt man in ein 3 cm weites U-Rohr aus Jenaer Glas, das mit von oben hineinragenden Kohleelektroden versehen ist und in einem Heizkasten steht. Man evakuiert und elektrolysiert das geschmolzene Salz. Die Pumpe soll durch ein 1 m langes, mit Kaliumcarbonat gefülltes Rohr geschützt werden. Stromstärke: 2,8 Ampere bei 10 Volt.

e) Kohlendioxyd ist besonders einfach in großer Reinheit herzustellen. Man füllt Magnesiumcarbonat in ein einseitig geschlossenes Rohr aus schwerschmelzbarem Glas und erhitzt auf Rotglut.

f) Helium. Die moderne Methode, Helium in großen Mengen aus den Edelgasrückständen bei der Luftverflüssigung abzuscheiden ist, wenn es sich nur um gelegentlichen Bedarf handelt, zu kompliziert. Man verwendet für solche Fälle als Ausgangsmaterial die Mineralien Cleveit, Monazit oder Thorianit, in denen erhebliche Mengen Helium okkludiert sind. Methoden zur Abscheidung und Reinigung des Gases sind bei MOSER (l. c.), und bei RAMSAY und RUDORF[20]) zu finden. STARK[21]) stellte Helium für spektroskopische Zwecke in folgender Weise dar: 50 g Cleveit wurden gepulvert und dann mit ebensoviel zuvor geschmolzenem und pulverisiertem Kaliumbisulfat gemischt. Diese Mischung kam, auf drei Tonrillen verteilt, in ein Porzellanrohr von 90 cm Länge und 3 cm lichter Weite. In das letzte Stück des Rohres wurden kleine Stücke von geschmolzenem Bleichromat gebracht, um etwa auftretende Schwefelverbindungen zurückzuhalten. Das Rohr wurde in einem Verbrennungsofen auf 250—350° erhitzt, das freiwerdende Helium mittels eines Stromes von reinem Kohlendioxyd durch eine Waschflasche mit konzentrierter Schwefelsäure und ein Verbrennungsrohr mit glühendem Kupferoxyd geleitet und in einer Gasburette über Kalilauge aufgefangen. Die 50 g Cleveit ergaben in 3—4 Stunden etwa 200 ccm Rohgas, das nur noch spurenweise Sauerstoff und Wasserstoff enthielt. Von diesen Verunreinigungen wurde das Helium durch Behandlung mit glühendem Kupferoxyd und metallischem Calcium befreit (siehe unten!).

---

[20]) W. RAMSAY und G. RUDORF, „Die Edelgase", Leipzig, Akadem. Verlag 1918.

Kleine Mengen, einige Kubikzentimeter von Atmosphärendruck, kann man unter Verzicht auf möglichste Ausbeute und höchste Reinheit sehr einfach durch Erhitzen von einigen Gramm der erwähnten Mineralien im Vakuum herstellen. Da Helium von mit flüssiger Luft gekühlter Kokosnußkohle (vgl. den Artikel von Herrn GAEDE!) bedeutend weniger adsorbiert wird als alle anderen Gase, ist es unschwer auf diesem Wege sowohl von den bei der Herstellung erzeugten, als auch von den etwa im Entladungsrohr entstehenden Beimengungen zu reinigen. Gerade die modernen Dampfstrahlpumpen, die zwischen Vor- und Hauptvakuum eine Druckdifferenz von 10—20 mm aufrecht erhalten, sind für diesen Fall als Zirkulationspumpen vortrefflich geeignet, da sie ein kleines Volumen besitzen und da auch das Vorvakuum absolut dicht ist. Das verunreinigte Helium wird aus dem Entlandungsrohr in die Pumpe gesaugt und strömt von dieser durch eine mit (entsprechend vorbehandelter) Kokoskohle gefüllte Ausfriertasche in das Rohr zurück.

Neuerdings bringt die „Gesellschaft für Lindes Eismaschinen, Höllriegelskreuth bei München", Helium in Handel, dessen wesentlichste Beimengung lediglich aus ca. 1% Neon besteht. Das Gas wird in Glasbehältern geliefert, die ein mit einer dünnwandigen kleinen Glaskalotte verschlossenes Ansatzrohr besitzen. In dieses läßt man ein Stück Eisen gleiten und verschmilzt es dann mit der Apparatur. Nach dem Evakuieren zertrümmert man die Kalotte mittels des durch einen Magneten gehobenen Eisenstückes.

g) Neon, Argon, Krypton und Xenon. Die ältere Literatur über Darstellung und Eigenschaften der Edelgase findet sich in dem inhaltreichen, obenerwähnten (Fußnote S. 399) Buche von RAMSAY und RUDORF. Die immerhin umständliche Darstellung dieser Gase dürfte sich jedoch kaum mehr verlohnen, nachdem dieselben von einigen Firmen, z. B. der chemischen Fabrik „Griesheim-Elektron" in Griesheim und der obengenannten „Gesellschaft für Lindes Eismaschinen" in Handel gebracht werden. Letztere stellt z. B. 99 proz. Neon, 99,5 proz. Argon, hochprozentiges Krypton und sogar Xenon dar, das nur mit 5% Krypton verunreinigt ist.

Befreiung der Edelgase von chemisch angreifbaren Gasen.

a) Das Calciumverfahren von SODDY[22]). Geraspeltes Calciummetall (KAHLBAUM) wird in einem Quarz- oder Porzellanrohr auf 400—600° erhitzt, während man das Edelgas hindurchzirkulieren läßt. Dadurch

[22]) F. SODDY, Proc. Roy. Soc. 78, 429. 1907. Vgl. auch BRANDT, Diss. Leipzig 1915, ferner W. F. MEGGERS und KEIVIN BURNS, Scient. Pap. Bureau of Stand.

werden bei Atmosphärendruck in etwa einer Stunde alle verunreinigenden Gase, mit denen das Calcium reagiert, entfernt, mit Ausnahme von Wasserstoff. Dieser wird nachträglich entfernt, indem man das Calcium auf 250° abkühlt. Dieses Verfahren wird von vielen als das beste bezeichnet BORN[23]) empfiehlt als bessere Methode einen zwischen Calciumelektroden brennenden Lichtbogen, der, 4 Stunden fast ohne Wartung brennend, das Gas vollkommen reinigte. (2 Amp, 220 Volt, Anode 15, Kathode 10 mm Durchmesser. Gasdruck 15 mm Hg)

b) HEMPEL[24]) verwendet als absorbierende Mischung 4 Gew Teile Magnesium, 20 frisch gebrannten Kalk und 1 metallisches Natrium, in einem Rohr aus Verbrennungsglas auf dunkle Rotglut erhitzt.

c) GEHLHOFF[25]) empfiehlt, eine Glimmentladung in Kaliumdampf von 200° zur Reinigung des Gases zu verwenden. Die Firma Rud. Goetze Leipzig bringt die GEHLHOFFsche Anordnung gebrauchsfertig in Handel.

Gelegentlich findet man in der Literatur die Bemerkung, daß sich edelgasgefüllte Entladungsröhren bei längerem Betrieb von selbst reinigen.

6. Das Abschmelzen evakuierter Röhren.

Soll das evakuierte Rohr von der Pumpe getrennt werden, so muß eine „Abschmelzstelle" vorgesehen sein, an der das Lumen der Vakuumleitung auf 2—3 mm verjüngt und gleichzeitig die Wandstärke auf ca. 2 mm vergrößert ist. Diese Stelle wird zum Abschmelzen mit einer kleinen, leuchtenden Flamme des Handgebläses vorsichtig erwärmt, bis sie bei allmählich gesteigerter Temperatur (Luftzufuhr!) langsam vom äußeren Luftdruck zusammengedrückt wird. Ist die Abschmelzstelle zu weit oder zu dünnwandig oder ist das Glas zu stark erweicht, so wird es zu einer unregelmäßig gestalteten Form nach innen eingedrückt und diese Stelle springt dann häufig beim Erkalten. — Die zusammengefallene Stelle erhitzt man etwas stärker, zieht das Rohr einige Zentimeter weit ab, so daß das erweichte Glas ein Stäbchen bildet und schmilzt dieses in der Nähe des Rohres mit scharfer, heißer Flamme durch. Durch weiteres Erhitzen erzeugt man ein kleines Glaskügelchen und kühlt endlich sorgfältig in der leuchtenden Flamme.

Das Abschmelzen ist so zwar einfach und schnell ausführbar, es muß aber folgendes dabei beachtet werden:

Das Glas läßt sich nie so vollständig entgasen, daß nicht beim Erhitzen auf noch höhere Temperatur, wie beim Abschmelzen, neuerdings

---

[23]) F. BORN, Ann. Phys. 69, 473. 1922.

[24]) W. HEMPEL, Gasanalytische Methoden. 4. Aufl. Braunschweig, Friedr Vieweg & Sohn. 1913

wieder Gas frei würde. Handelt es sich um das Abschmelzen eines möglichst hoch evakuierten Rohres, so soll man deshalb den Moment des Verschlusses einige Minuten hinausziehen, um der ständig arbeitenden Pumpe Zeit zu geben, das freigewordene Gas fortzuschaffen. DUNOYER gibt ein Zahlenbeispiel hierfür an. In einem Rohr stieg der Druck von 0,001 Tausendstel Millimeter vor, auf 0,25 Tausendstel Millimeter nach dem raschen Abschmelzen, also auf das 250fache; bei langsamem Abschmelzen dagegen von 0,001 auf 0,01 Tausendstel Millimeter, also nur auf das Zehnfache (Vielfach bereiten Glasbläser zwei Abschmelzstellen hintereinander vor, trennen an der einen die Röhre provisorisch von der Pumpe, um die zweite, an dem nun beweglich gewordenen Rohr, sauberer abschmelzen zu können. Bei Hochvakuumröhren ist dies nach dem oben Gesagten sehr bedenklich.)

Zweitens darf man beim Aufbau des zu evakuierenden Rohres nicht vergessen, daß man die Möglichkeit haben muß, es beim Abschmelzen einige Zentimeter weit abzuziehen Bei sehr großen Rohren ist es manchmal bequemer, die Pumpe zurückzuziehen. Als Notbehelf kann man senkrecht zur Rohrachse ein dünnes Glasstäbchen anschmelzen und mit dessen Hilfe das Glas seitlich herausziehen.

Sechstes Kapitel.

Dünne Folien, feine Drähte und Quarzfäden.

1. Metallfolien.

Einige duktile Metalle lassen sich durch Hämmern zwischen Blättern aus Pergament oder Goldschlägerhaut (siehe unten!) zu sehr dünnen Folien verarbeiten. Dieses Verfahren war übrigens schon den alten Ägyptern und Griechen bekannt, und aus einer Angabe von PLINIUS folgt, daß das römische Blattgold ca. 0,4 μ dick war.

Vorzugsweise werden Gold- und Aluminiumfolien hergestellt, auch Kupfer-, Tombak- und Silberfolien. Die ersteren sind in jeder Blattmetallhandlung käuflich. Die Dicke von Kupfer-, Silber- und Aluminiumfolien verschiedener Herkunft ergab sich ziemlich gleichmäßig zu etwa 0,5 μ, die Dicke von Blattgold schwankt zwischen 0,14 und 0,09 μ. Diese Folien besitzen, wie die Prüfung vor der Lampe zeigt, zahlreiche Löcher. Sie sind daher keineswegs gasdicht und die Zerreißfestigkeit von mehreren, aus demselben Stück geschnittenen schmalen Streifen ist sehr verschieden groß.

Etwas dickere, geschlagene Aluminiumfolie ist nur schwer aufzutreiben.

„garantiert lochfreie" Folie von Leybold, Köln ist 5 μ dick. Die dünnste gewalzte Aluminiumfolie von Heraeus-Hanau, die beim Schütteln schon merklich klirrt, wie dünnes Blech, hat gleichfalls eine Dicke von 5 μ.

Platin läßt sich anscheinend nicht durch Hämmern (wie Gold) zu Folien verarbeiten; wenigstens werden solche Folien nicht fabrikmäßig hergestellt. Heraeus, Hanau stellt gewalzte Platinfolie von 2 μ Dicke her, die noch sehr robust und nahezu lochfrei ist.

Schon FARADAY[1]) hat nach verschiedenen Methoden versucht, noch dünnere Metallfolien zu erhalten. Er erzeugte z. B. durch Reduktion einer Goldchloridlösung mittels Phosphordämpfen ein auf der Oberfläche schwimmendes Goldhäutchen, das er mit einer Glasplatte abheben konnte. Auch ließ er käufliches Blattgold auf Wasser schwimmen, in dem dann etwas Cyankalium aufgelöst wurde. Da Gold von Cyankalium unter Bildung von Aurokaliumcyanid gelöst wird, ließ sich auf diese Weise die Dicke der Folie verringern.

Ferner hat man versucht, auf einer Fläche durch Elektrolyse einen Metallüberzug zu erzeugen, der nicht fest haftet, da die Unterlage mit Öl oder Graphit eingerieben worden war. Der Überzug wird hierauf mit einer dicken Schicht, z. B. von Gelatine bedeckt und nach dem Erstarren derselben von seiner Unterlage abgerissen. Zuletzt wird die Gelatineschicht etwa durch heißes Wasser entfernt.

Verschiedene Physiker haben folgenden Weg eingeschlagen: Ein chemisch schwer angreifbares Metall (Platin, Gold) wird elektrolytisch als dünner Überzug auf einem Blech aus chemisch leicht angreifbarem Metall (z. B. Kupfer) niedergeschlagen. Badet man dann etwa ein so verplatiniertes Kupferblech in verdünnter Salpetersäure, so wird das Kupfer gelöst und die Edelmetallfolie bleibt zurück. Auf diese Weise hat schon OUTERBRIDGE[2]) im Jahre 1877 Goldfolien von 0,02 μ hergestellt, einzelne Stücke waren sogar schätzungsweise nur 0,002 μ dick. Heraeus-Hanau bringt blank verplatiniertes Kupferblech zur Herstellung von Platinfolien von 0,5 bis zu 0,1 μ Dicke in Handel (Verfahren von DR. ROHN). Merkwürdigerweise ist dieser elektrolytische Überzug keineswegs spannungsfrei: er rollt sich, wenn man das Blech ohne Vorbehandlung in Säure löst, zu einem Röhrchen von Stricknadeldicke zusammen. Um dies zu verhindern, soll das Blech vor dem Abätzen möglichst kurz, 1/2 Sekunde lang, auf dunkle Rotglut erhitzt werden. Erhitzt man länger, so legiert sich das Platin mit dem Kupfer. Bei früheren Versuchen des Verfassers mit diesen Heraeus-Folien ergab sich,

---

[1]) M. FARADAY, Exper. res. 4, 391ff. 1856.

[2]) A. E. OUTERBRIDGE: Vgl. PATTERSON DU BOIS, Proc. Amer. Phil. Soc. 34.

daß der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes nur etwa halb so groß war wie der von reinem Platin; vermutlich läßt sich daher ein Legieren doch nicht ganz vermeiden.

1925 hat C. MÜLLER[3]) dieses Verfahren weiter entwickelt, indem er den dünnen elektrolytischen Niederschlag nochmals mit einer Schutzschicht überzog und außerdem die beiden Schutzschichten sehr dünn machte. Sie bestehen z. B. aus elektrolytisch niedergeschlagenem Kupfer von nur 10 μ Dicke. So wird verhindert, daß durch ungleichmäßigen Angriff des Ätzmittels stehenbleibende Reste der Schutzschicht sich werfen und dadurch die Folie zerreißen, außerdem wird die Folie erst zum Schluß dem Angriff des Ätzmittels ausgesetzt. Mit diesem (im In- und Ausland unter Schutz gestellten) Verfahren konnte MÜLLER membranartige Folien aus Nickel und Gold von 6 cm Durchmesser bis zu Stärken von 0,04 μ herstellen, solche von 2 cm Durchmesser bis zu 0,02 μ und einige kleinere sogar bis zu 0,01 μ. Auch Silber, Platin- und Eisenfolien wurden ohne Schwierigkeiten bis zu Dicken unter 0,04 μ gewonnen. Den dünnsten, von kleinen Metallringen getragenen Goldfolien war einiger Luftzug schon gefährlich; dagegen waren Nickelfolien von 0,01 μ Dicke noch sehr beständig und von einer bemerkenswerten Elastizität: Membranen von 6 cm Durchmesser und 0,04 μ Dicke konnten durchgebogen werden, bis der Biegungspfeil 1 mm betrug, bei 0,25 μ hielten sie, auf eine Siebfläche mit 0,6 mm weiten Löchern gelegt, Überdrucke bis zu 25 cm Quecksilbersäule aus. Die dünnsten Folien sind sehr lichtdurchlässig. Ihre Oberfläche erscheint bei starker Vergrößerung als „glasartige, strukturlose, nur ganz vereinzelt von Poren durchbrochene Haut" Bei Folien von 0,01 μ liegen nur noch 30 Atomschichten übereinander.

Probefolien können durch Vermittlung von Herrn Regierungsrat DR CARL MÜLLER, Physikalisch-Technische Reichsanstalt Berlin-Charlottenburg, erhalten werden.

Erwähnt sei die z. B. von LUMMER und KURLBAUM[4]) benutzte, nach dem Verfahren von WOLLASTON (vgl. S. 408) hergestellte Platinfolie, die jedoch nach MÜLLER schon bei Dicken von 0,5 μ erhebliche Ungleichmäßigkeiten und Porositäten zeigt. Eine Bezugsquelle für derartige Folie konnte Verfasser nicht ermitteln.

Endlich sei auf das elegante Verfahren von CRAIG[5]) hingewiesen, der dünne Wismuthäute auf Glimmer zur Untersuchung des Halleffektes erzeugte, indem er ein Glimmerblatt in geschmolzenes Wismut eintauchte.

---

[3]) C. MÜLLER, Sitz.-Ber. d. Preuß. Akad. 25, 464. 1925.

[4]) O LUMMER und F. KURLBAUM, Wied. Ann. 46, 217. 1892.

Wenn die Temperatur sorgfältig einreguliert ist, erhält man so „erstaunlich dünne und gleichmäßige Folien" (die schon in einem Feld von 1 Gauß einen gut meßbaren Halleffekt ergeben).

2. Handhabung der Folien (Elektrometerblättchen).

a) Robustere Folien, z B. das gewalzte Platin und Aluminium, auch Blattaluminium, legt man zwischen zwei Blätter von fettfreiem, dünnem Papier (Schreibmaschinen-Durchschlagpapier) und schneidet mit der Schere Papier und Folie.

b) Um feinere Folien, Blattaluminium, auch Blattgold zu schneiden, benützt man ein stramm mit Leder überzogenes Kissen Dieses wird mit Magnesiumkarbonat oder Kreide eingerieben und das Blatt der Folie vorsichtig, unter Vermeidung von Luftzug, daraufgelegt. Dann schneidet man mit einem scharfen, schartenfreien Messer mit flacher, gerader Klinge die benötigten Streifchen ab.

c) Die Ränder der nach a) oder b) erhaltenen Blättchen erweisen sich bei Betrachtung unter dem Ablesemikroskop in der Regel als zackig, schartig. Außerdem hat man bei Verwendung sehr zarter Folien auch mit der zweiten Methode häufig Mißerfolge. Endlich gelingt es nur schwer, schmale Streifen von gleichmäßiger Breite nach dem Augenmaß zu schneiden. Ein umständlicheres Verfahren, das aber den beiden ersten weit überlegen ist, hat BEATTY[6]) angegeben. Es besteht darin, daß man die Folie wie ein histologisches Präparat in Paraffin einbettet, auf den Wagen der Teilmaschine aufspannt und die Streifen mit einem in das Reisserwerk eingespannten Messer schneidet. Es ist günstig, wenn das Paraffin leicht schmelzbar und staubfrei ist; am besten filtriert man es unter ständigem Fächeln mit einem Bunsenbrenner durch Filtrierpapier in ein Reagenzglas und hebt es gut verschlossen auf. Man nimmt einen Streifen Glasplatte (photographische Trockenplatte), erwärmt ihn und das Reagenzglas, gießt einige Tropfen Paraffin auf die Platte, verteilt sie durch weiteres Erwärmen und läßt die Platte wieder erkalten. Dann schneidet man einen Streifen (5—10 mm breit) von der Folie ab, legt ihn auf die Platte, klebt ihn durch Schmelzen der Paraffinschicht fest und gießt etwas Paraffin auf die Oberfläche der Folie, so daß diese vollständig in Paraffin eingebettet wird. Weiter ist wesentlich, daß die Paraffinschicht möglichst dünn ist, damit sie nicht, durch das Messer zur Seite gedrückt, die Folie abquetsche: Man erwärmt so stark, daß das Paraffin dünnflüssig wird, kippt die Platte, hält die abwärts gleitende Folie mit dem Finger und entfernt möglichst viel Paraffin durch Abtropfen und Abstreifen. Hierauf läßt man in horizontaler Lage erstarren.

— Es ist nun ein leichtes, auf der Teilmaschine mittels eines scharfen (Rasier-) Messers schmale, gleichmäßige Streifen (von 0,2—4 mm Breite) auszuschneiden In der Durchsicht kann man erkennen, ob die Schnitte glatt sind.

Dann legt man die Platte in eine photographische Schale mit Xylol („techn."), welches das Paraffin schnell löst Hatte man Streifchen von 0,2—0,3 mm Breite aus Blattaluminium geschnitten, so faßt man eines am Ende mit einer guten Pinzette, zieht es heraus, taucht es in ein zweites Bad von reinem Xylol (Becherglas), läßt es schwimmen bis man die Pinzette flüchtig gereinigt hat, faßt es wieder und bringt es in Alkohol (in einem zweiten Becherglas). Endlich wird das Streifchen an der Luft getrocknet und zur weiteren Verwendung in eine Schachtel gelegt. — Breitere Streifen von Aluminium- und besonders von Goldfolie dagegen werden beim Herausziehen durch die kapillaren Kräfte der Oberfläche zusammengeknittert Man muß daher in diesem Fall ein Streifchen Papier unter die Folie legen und sie mit diesem zusammen herausziehen. Die übrige Behandlung ist genau, wie oben angegeben.

Elektrometerblättchen, die übrigens für Ablesung mit dem Mikroskop nur 2—3 mm breit sein sollen, werden auf den Träger gelegt, so daß sie gut parallel zu seiner Achse sind, und am oberen Rand festgeklebt. Das Klebemittel darf nicht isolieren; deshalb sind Schellacklösung, Picein u. a. unbrauchbar. Empfehlenswert ist Eiweiß, wasserfreies Lanolin, Speichel, besonders aber, weil gut klebend und auch bei schärfster Trocknung genügend leitend — Ohrenschmalz

Obwohl bei gleicher Breite ein Goldblättchen (0,12 μ) doppelt so schwer ist wie ein Aluminiumblättchen (0,5 μ), ist bei Messungen ersteres vorzuziehen: Aluminiumblättchen zeigen nämlich nicht selten einen sog. „Cri-Cri-Effekt", d. h. das noch immer etwas blechähnliche Aluminiumblatt springt unter Umständen bei gleichmäßiger Abnahme der elektrischen Ladung um mehrere Okular-Skalenteile zurück. Durch Erhitzen des Blättchens auf 400—500° läßt sich diese Störung verringern oder beseitigen.

Saiten für Galvanometer und Elektrometer aus Folienstreifen von 0,2—0,3 mm Breite zeichnen sich durch große Luftdämpfung und (bei Aluminium) kleine Masse aus[7]). Aluminiumsaiten können bequem mit Woodschem Metall (vgl. S. 342) angelötet werden, nur muß man dabei jede Spur von Flußmittel (Lötwasser, Lötfett usw.) vermeiden, da sich herausgestellt hat, daß sonst die Lötestelle nach einigen Wochen elektrisch isoliert. Die Zuführungsstifte werden (unter Zuhilfenahme

von Lötwasser usw) verzinnt, hierauf aber das Flußmittel sorgfältig abgewaschen.

Abschmelzsicherungen für kleine Stromstärken lassen sich auf dieselbe Weise aus 0,1—0,2 mm breiten Streifen von Zinnfolie (Stanniol) herstellen. Bei verschiedenen Versuchen ergab sich der Minimal-Abschmelzstrom zu 0,1 Ampere. Dieser verhältnismäßig hohe Wert rührt daher, daß bei den dünnen Streifen das Verhältnis Querschnitt · abkühlender Oberfläche sehr ungünstig wird. Auch MÜLLER (l. c. S. 404) hebt die überraschend hohe Strombelastbarkeit seiner dünnen Folien hervor.

3. Folien aus organischem Material.

a) „Goldschlägerhaut" ist eine dünne, bräunlich durchsichtige Folie. Sie besteht aus einer besonders präparierten Membran vom Blinddarm des Ochsen, dient in der Goldschlägerei als Zwischenlage der einzelnen Metallblätter während des Schlagens und kann von Blattmetallfabriken bezogen werden.

b) Zelluloidmembranen von 10—0,3 μ Dicke lassen sich leicht durch Aufgießen von Zaponlack auf Wasser herstellen, sind sehr robust, gasdicht und zeigen prachtvoll leuchtende Interferenzfarben. TRENKTROG hat in seiner Dissertation (Kiel 1923) ein Herstellungsverfahren beschrieben. Man macht Wasser durch Auskochen luftfrei und gießt es in eine Schale von 20—30 cm Durchmesser. In diese senkt man einen Drahtring (von ca. 5 cm Durchmesser) ein, der später als Träger der Folie dienen soll, und der einen angelöteten, aus dem Wasser herausragenden Halter besitzt. Dann gießt man einige Tropfen „Zaponlack" rasch, in einem Zug, in die Mitte der Wasseroberfläche. Der Lack breitet sich aus und darf dabei die Wand der Schale nirgends berühren. Man läßt die Schicht vor Staub geschützt $^1/_2$ Stunde trocknen, hebt sie mittels des Drahtrahmens vorsichtig heraus und bringt sie für eine Stunde in den Trockenschrank. — Zaponlack ist eine Lösung von Zelluloid in einer Mischung von Amylacetat und Aceton. Zelluloid in reinem Aceton zeigt nach TRENKTROG langsamere Ausbreitung und Verdunstung und gibt robuste, aber mit vielen Blasen und Löchern durchsetzte Schichten; Zelluloid in reinem Amylacetat ergibt gleichmäßigere aber weniger feste Schichten. Besonders leuchtende Interferenzfarben erhält man durch Zusatz von 20% Äther zu Zaponlack. — Die Brauchbarkeit als Fenster für Vakuumröhren wird durch folgende Angaben charakterisiert:

Durchm.	Dicke	Hg-Druck	Gegen
1 mm	6—10 μ	760 mm	Kathodenstrahlvakuum

4. Feine Drähte.

a) „Haardrähte" von Hartmann & Braun. Unter dieser Bezeichnung werden von Hartmann & Braun (Frankfurt am Main-West 13) Drähte aus Silber, Kupfer, Gold, Platin, Nickel, Eisen, Aluminium, Messing, Phosphorbronze, Neusilber, Stahl, Platin-Iridium, Platin-Silber, Nickelin, Manganin, Konstantan, Kulmitz, Kruppin und Wismut in Handel gebracht mit Durchmessern von 0,20 mm bis herab zu 0,015 mm (15 μ), (Wismut nur bis 0,06 mm). Drahtlänge nach Bestellung von 1—10 m. Die Drähte sind auf Spulen von 32 mm Durchmesser aufgewickelt, so daß eine Windung 10 cm lang ist Beim Abwickeln muß man vorsichtig sein, daß sich der Draht nicht verwirrt: Man befestigt das eingeklemmte Ende mit Klebwachs auf einer Glasplatte, wickelt unter ständiger Spannung die benötigte Länge ab, klemmt den Draht wieder in den Einschnitt an der Spule fest, klebt ihn auch bei der Spule an die Platte und schneidet ihn dann erst zwischen Spule und zweiter Klebstelle durch. Die Tragfähigkeit eines Phosphorbronzedrahtes von 0,02 mm Durchmesser ist 20 g Eine Lötung führt man auch hier besser ohne Flußmittel aus, da die feinen Drähte sonst allmählich angegriffen werden (Lötvorrichtung S 353).

b) Drähte nach Taylor Metalldrähte mit einem Glasüberzug kann man in Dicken bis zu 0,1 μ herstellen indem man ein erweichtes Glasrohr, das mit dem geschmolzenen Metall gefüllt ist, durch ein konisches Loch in einem erhitzten Kupferklotz zieht (in ähnlicher Weise, wie man Drähte durch ein Zieheisen zieht). Taylor[8]), von dem dieses Verfahren stammt, erhielt so Drähte aus: Kupfer, Silber, Gold, Blei, Zinn, Cadmium Thallium, Eisen, Kobalt, Calcium, Indium, Wismut und Antimon. Der Glasüberzug läßt sich später durch Ätzen mit Flußsäure entfernen.

c) Wollastondrähte. Ein ähnliches Verfahren, das von Wollaston (1813) stammt und sich sehr eingebürgert hat, gestattet Gold- und Platindrähte bis zu 0,5 μ sowie Aluminiumdrähte bis zu 2 μ Dicke herzustellen. Es wird dazu z. B. ein dünner Platindraht mit einer dicken, zylindrischen Silberschicht umkleidet. Zieht man den furnierten Draht aus, bis sein Durchmesser nur noch 0,2 mm beträgt, so hat sich der Durchmesser der Platinseele entsprechend stark verringert. Nun wird der Draht mit Salpetersäure behandelt, die wohl Silber, nicht aber Platin löst und dadurch die feine Platinseele freilegt. Man ätzt jeweils nur ein Stück von der gerade benötigten Länge ab.

Bezugsquelle: z. B. W. C. Heraeus, Hanau; übliche Durchmesser 15—2 μ.

Abätzungsvorschrift: Man bereitet vor. Ein Glasstäbchen von ca. 20 cm Länge, das unten zwei kurze (1 cm lange), angeschmolzene Ansätze trägt (Fig. 21), die paraffiniert werden. Ein Stativ, in das die gezeichnete Vorrichtung eingeklemmt wird, so daß sie leicht vertikal verschoben werden kann, ohne horizontal auszuschlagen — Ein Stück Wollastondraht, das von einem Ansatz bis zum anderen reicht, wird abgeschnitten, geradegebogen und auf einem dicken Blech über einem Bunsenbrenner etwa 1 Minute lang auf 400° erhitzt (ein auf das Blech gelegtes Stückchen Blei schmilzt). Dann klebt man den Draht, ohne ihn zu biegen oder viel anzufassen, mit Paraffin auf die Ansätze des Halters Fig. 21. — In einer kleinen Mensur werden 2 Teile konzentrierte Salpetersäure (chlorfrei) mit 1 Teil dest. Wasser gemischt, und der Draht wird in die durch die Verdünnung erwärmte Säure getaucht. Man beobachtet das Auftreten einiger Gasbläschen und einiger Verdickungen, die aus Silber und Silbernitrat bestehen, und befreit den Draht davon, indem man ihn mehrmals herauszieht. Sein Durchmesser verringert sich „zusehends", und nach etwa 5 Minuten ist die in dem Säurebad kaum sichtbare Platinseele freigelegt. Der Draht wird dann herausgezogen und mehrmals in destilliertes Wasser getaucht.

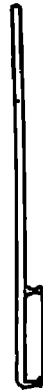



Fig. 21. Vorrichtung z. Abätzen von Wollastondrähten.

Um den abgeätzten Draht verwenden zu können, muß er nun noch an zwei Häkchen (Dolezalek-elektrometer) oder Stifte (Saitengalvanometer) angelötet werden. Diese schraubt man am besten auf einer Lehre so fest, daß man mit ihren vorher verzinnten Enden den horizontalen, scharf beleuchteten Draht nahezu berühren kann, verlötet den Draht mittels eines kleinen Kolbens und reißt die zu den paraffinierten Enden führenden Stücke ab. — Oder man legt den Halter Fig. 21 auf ein starkes Blech und erwärmt mit dem untergestellten Bunsenbrenner bis das Paraffin schmilzt (dabei Vorsicht wegen der kapillaren Anziehung!) und verdampft. Dann kann man die nicht abgeätzten Enden mit einer guten Pinzette fassen und auf die anzulötenden Häkchen legen.

Benedicks[0]) findet, daß feine Wollastondrähte (2 μ und darunter) häufig abgerissen werden, wenn der Draht an beiden Enden befestigt ist, wie oben angegeben. Er empfiehlt, in den nicht abgeätzten Draht einen Knoten wie Fig. 22 zu machen, der sich nach dem Abätzen zuzieht, und das Ende durch ein wenige Millimeter langes, verdrilltes Stückchen Platin-Haardraht zu beschweren. Nachdem diese Einrichtung getroffen ist, wird der Draht (wie oben) ausgeheizt, hierauf, an einem Stativ be-

festigt, in konzentrierte, auf 60—80° erwärmte Salpetersäure getaucht, und zwar zunächst nur bis über den Knoten. Erst wenn sich dieser mit einem Ruck zugezogen hat, taucht man allmählich tiefer ein und verfährt im übrigen wie oben angegeben.

SUHRMANN und CLUSIUS[10]) machen den abzuätzenden Draht zur Anode eines in sich kurzgeschlossenen Elementes, dessen Kathode ein Streifen Platinfolie und dessen Elektrolyt Cyankaliumlösung ist. Die Abtragung des Silbers geht ohne Glasentwicklung vor sich und dauert eine Stunde. Die Platinseele wird, wie FRIESE und WAETZMANN[11]) hervorheben, bei der elektrolytischen Entfernung des Silbers in Kaliumsilbercyanidlösung

wesentlich blanker als bei der Ätzung mit Salpetersäure.

Fig. 22. Knoten zum Abätzen von Wollastondrähten.

d) „Lametta" ist feines Metallband von etwa 0,3 mm Breite und 7 μ Dicke, das durch Plattwalzen von Kupferdraht hergestellt wird Es kann von Instrumentenfabriken bezogen werden und dient besonders als Suspension für Drehspulengalvanometer, da es bei gleicher Tragkraft ein wesentlich kleineres Torsionsmoment als ein zylindrischer Draht hat. — Verschiedene Physiker, z. B. BENEDICKS (l. c.) und LEIMBACH[12]), haben durch Walzen des nicht abgeätzten Wollastondrahtes äußerst feines Lametta hergestellt. Letzterer erhielt so Bänder von 25 μ Breite und 0,28 μ Dicke, die zu Bolometerstreifen verwendet wurden. 1 cm davon hatte einen Widerstand von 138 Ohm.

Wie auf S. 387 hervorgehoben, zeigen die nach dem sog. „Pintschverfahren" hergestellten, aus einem einzigen Kristall bestehenden Wolframdrähte („Einkristalldrähte") im Gegensatz zu allen Drähten aus anderen Metallen keine elastische Nachwirkung. Dies bedeutet bei gewissen Messungen einen ganz bedeutenden Vorzug. Wolfram-Einkristalldrähte wurden bis zu 5 μ (im Minimum) hergestellt.

5. Quarzfäden.

Wegen ihrer hohen (spezifischen) Zerreißfestigkeit, ihrer geringen elastischen Nachwirkung und der Möglichkeit, sie in sehr großer Feinheit (von 15 bis 0,5 μ) herzustellen, sind die Fäden aus geschmolzenem Quarz dem Experimentalphysiker ein unentbehrliches Material für feine Suspensionen geworden. Es wird geraten, die Quarzfäden von der gewünschten Dicke von Instrumentenfabriken, z. B. von Edelmann-München zu beziehen. Einige Herstellungsverfahren seien jedoch im folgenden kurz angegeben.

---

[10]) R. SUHRMANN und K. CLUSIUS, Phys ZS. 26, 913. 1926.

[11]) J. FRIESE und E. WAETZMANN, ZS f Phys. 34, 131. 1925.

ach dem alten Verfahren von BOYS[13]) klemmt man das eine Ende
s Quarzglasstäbchens fest und befestigt das andere an dem Bolzen
r Armbrust, der abgeschossen wird, wenn das Stäbchen in der Knall-
ebläseflamme erweicht ist. KEMLEY[14]) hat neuerdings diese Methode
essert, indem er ein gespanntes Gummiband zum Auseinanderziehen
rendet. Derselbe empfiehlt besonders, einen dünnen, vertikal
genden am unteren Ende beschwerten Quarzfaden mit einer Heiz-
ale zu umgeben und ihn in einer Wasserstoffatmosphäre sich spontan
iehen zu lassen. — Sehr elegant ist die von NICHOLS angegebene
schrift: Man bringt einen Quarzfaden von einigen Zehntelmillimetern
te mit dem äußersten Ende in eine kleine, vertikalgestellte Flamme
Knallgasgebläses. Sofort schießt ein sehr feiner Faden einige Meter
ı oben und wird auf einem Tuch aus schwarzem Samt aufgefangen.
uarzfäden von wenigen μ Dicke können bekanntlich geometrisch
sch nicht mehr gesehen werden. Bei geeigneter Beleuchtung ist
ch das Beugungsbild so hell, daß man ohne Mühe mit dem Faden
ieren kann. Man legt ihn am besten auf einen horizontalen Spiegel,
einerseits staubfrei sein soll, andererseits nicht im geringsten reibungs-
trisch sein darf. Auf dem Spiegel bringt man zwei Marken an, welche
richtige Entfernung der durch den Faden zu verbindenden Stücke
eben. Zum Fassen des Fadens kann man eine Pinzette benützen,
n ihre Klauen ganz vorn greifen. Man prüft dies unter einem schwach
größerndem Mikroskop und schleift sie evtl. auf einem Ölstein nach.
ı die Klauen sehr schmal und spitzig sind, ist nicht nötig. Zum Ein-
en eines Quarzfadens bereitet man außerdem einige fettfreie Draht-
kchen und etwas dicke Schellacklösung vor. Die Quarzfäden werden
beiden Enden angeklebt geliefert. Man reißt einen Faden nahe dem
n Ende mit der Pinzette ab, faßt ihn am anderen Ende und bringt
auf den Spiegel. Dünne Fäden legen sich meist wegen schwacher
strömungen nicht nieder. Man legt dann ein oder zwei Drahtstücke
r über den Faden und dirigiert ihn so, daß er die beiden Entfernungs-
ken verbindet. Hierauf hebt man sein eines Ende mit der Pinzette
ı, schiebt den anzukittenden Apparatteil darunter, richtet sehr sorg-
g axial aus und klebt den Faden mit einer Spur Schellacklösung fest,
man durch einen genäherten warmen Lötkolben zum rascheren Er-
ren bringen kann. Ebenso wird das zweite Ende befestigt. Dann
ernt man die aufgelegten Drähte, faßt die obere Aufhängung mit der
ıd und neigt die Spiegelplatte vorsichtig, bis sich der Faden spannt
zuletzt, bei einer Neigung der Platte von 90°, das System trägt.

) C V BOYS. Phil. Mag. 45. 487. 1887.

Um Quarzfäden elektrisch leitend zu machen, kann man sie entweder (nach DOLEZALEK) in starker Chlorkalziumlösung baden, die eine hygroskopische Schicht bildet; die geringe Leitfähigkeit genügt jedoch höchstens für die statische Aufladung einer Elektrometernadel. Oder man versilbert den Faden (nach BÖTTCHER, S. 373) Sein Widerstand ist dann verhältnismäßig gering, aber seine elastischen Eigenschaften werden ungünstig beeinflußt. Zum Anlöten versilberter Quarzfäden ist nach englischen Quellen besonders eine Legierung von 50 Wismut, 31,25 Zinn und 18,75 Blei geeignet. Die beste, auch kürzlich von KEELEY (l. c. S 411) wieder empfohlene Methode ist die Verplatinierung des Fadens durch Kathodenzerstäubung (vgl. S. 382) Eine praktische Vorrichtung hierfür stammt von BESTELMEYER[15]). Als Kathode dient ein parallel zu dem (mit den Aufhängungshäkchen in das Rohr eingehängten) Quarzfaden gespannter Platindraht, und die Leitfähigkeit des Fadens kann während der Platinierung durch Entladung eines Blättchenelektroskopes geprüft werden.

Kokonfäden sind durch Quarzfäden und Wollastondrähte mit ihren viel günstigeren mechanischen und elastischen Eigenschaften fast völlig verdrängt worden. Sie können z. B von Hartmann & Braun bezogen werden. In KOHLRAUSCHS „Lehrbuch der praktischen Physik" findet sich (unter „Technisches") eine genaue Anleitung zum Abspulen der Seidenraupenkokons.

Spinnfäden werden in seltenen Fällen als Aufhängefäden, Elektrometerfäden[16]) oder als Material für Fadenkreuze benutzt. Manche Physiker empfehlen, die Fäden in möglichst frischem Zustand zu verwenden, d. h. eine gefangene Spinne im Laboratorium von einem erhöhten Punkt herabspringen zu lassen: Sie pflegt dabei an der Absprungstelle einen Faden anzuheften und nachzuziehen, den man ähnlich wie einen Quarzfaden aufwickelt. Frisch gesponnene Fäden lassen sich (im Gegensatz zu Quarzfäden) erheblich dehnen, ehe sie reißen.

Die Herstellung von Fadenkreuzen für Fernrohre geschieht nach freundlicher Mitteilung von Herrn Werkmeister MÜNCH vom geodätischen Institut der Technischen Hochschule München, der auf diesem Gebiet große Erfahrung besitzt, folgendermaßen: Als Material verwendet man Kokons von Spinnen, die man z. B. in den Ritzen von freistehenden Bretterhütten findet. Einige Kokons werden gesammelt und (etwa in einem Reagenzglas) zum späteren Gebrauch aufbewahrt. Auf dem Flansch, der das Fadenkreuz tragen soll, werden auf der Drehbank vier Marken angerissen, so daß ihre Verbindungslinien streng

[15]) A. BESTELMEYER, ZS. f. Instr. 25, 339. 1905.

rechtwinkelig sind. Ferner bereitet man eine Drahtgabel vor, deren beide Zinken etwa das anderthalbfache des Flanschdurchmessers Abstand haben — Man zieht aus dem Kokon einen Faden zunächst 1 cm weit heraus, klebt ihn an der einen Zinke fest und zieht dann weiter, indem man den Faden zwischen den befeuchteten Fingern reinigt, bis er über die andere Zinke hinausreicht. Auch an dieser wird er festgeklebt. Hierauf wird der Kokon abgeschnitten, die Gabel über den Flansch gelegt, der durch das Gewicht der Gabel gespannte Faden mit Hilfe einer Lupe mit den eingeritzten Marken zur Deckung gebracht und in dieser Lage mit einer Spur Zaponlack festgeklebt. Die Dicke dieser Spinnenkokonfäden beträgt etwa 5 μ.

Anhang Herstellung von Magnetsystemen für Nadelgalvanometer.

Obwohl die Magnetsysteme für fabrikmäßig hergestellte Galvanometer von den betreffenden Firmen (Panzergalvanometer nach DU BOIS-RUBENS: Siemens & Halske, PASCHEN-Galvanometer: Leybold) zu beziehen sind, haben sich die Physiker verschiedentlich und mit gutem Erfolg mit der Herstellung und Verbesserung derselben beschäftigt[17]) Wenn man mit dem System große Empfindlichkeit erreichen will, so muß man dasselbe so leicht als nur irgend möglich konstruieren[18]). Als Träger der Magnete benutzt man vorteilhaft ein dünnwandiges Glasröhrchen von etwa 0,5 mm Außendurchmesser, das man aus einem dünnwandigen, weiten Rohr durch Ausziehen herstellt. Man sucht ein gerades Stück von etwa 10 cm Länge dadurch aus, daß man die Stücke auf einer Spiegelglasplatte rollen läßt, oder richtet eines der Röhrchen im elektrischen Röhrenofen gerade, indem man es vertikal einspannt und am unteren Ende beschwert.

Zur Herstellung der kleinen Magnetchen eignen sich vorzüglich Stücke von der „Unruhfeder" einer Uhr, die in verschiedenen Stärken und Breiten zu haben sind. Sie müssen möglichst stark „gehärtet" werden. Dazu bringt man entweder ein geradegebogenes Stück der Feder einige Sekunden lang in eine kleine Bunsenbrennerflamme, taucht die Spitze, sobald sie hellglühend geworden ist, in kaltes Wasser und bricht sie — 3 bis 6 mm lang — ab. Noch besser kühlt man Quecksilber mit einer Kältemischung möglichst weit ab, befestigt die geradegebogene Unruhfeder dicht über seiner Oberfläche, glüht, indem man wenige Sekunden lang einen elektrischen Strom von ausprobierter Stärke hin-

[17]) H. WITT, ZS. f. Phys. 28, 238. 1924; D. S. PERFECT, Journ. scient. instr. 1, 321 und 353. 1924.

durchschickt und taucht die hellglühende Feder sofort nach Ausschalten des Stromes in das Quecksilber.

Hat man so 10—20 Stückchen hergestellt, so werden sie gemeinsam magnetisiert indem man sie mittels einer Messingpinzette einzeln an einen Pol eines kräftigen Elektromagneten bringt Die in der Richtung der Kraftlinien abstehenden Enden gleichen Vorzeichens bezeichnet man mit roter Farbe. Endlich wird ein Magnetchen nach dem anderen — die roten Enden alle auf derselben Seite — an das Glasröhrchen gekittet z. B. 5 Stück nebeneinander, das längste in der Mitte, auf die Vorderseite und 5 Stück auf die Rückseite. Benötigt man ein „astatisches System" so kittet man genau im Abstand der Spulenachsen nochmals 2 × 5 Magnetchen an, bei denen aber die roten Enden auf der anderen Seite liegen. Das Ankleben macht Schwierigkeit, da sich die Magnetchen kräftig anziehen bzw. abstoßen. Am besten wartet man mit dem Ankitten des neuen, bis der Kitt des alten erhärtet ist und fixiert es jeweils durch ein aufgedrücktes Gewicht. Als Kitt empfiehlt sich Syndetikon. Das fertige System wird kurz in stark verdünnte Schellacklösung getaucht.

Die Herstellung, günstigste Größe und Befestigung des Spiegels wurde S. 383 erörtert.

Siebentes Kapitel.

Isolatoren und hochohmige Widerstände[1]).

1. Isolatoren.

Physik und Hochspannungstechnik stellen sehr verschiedenartige Anforderungen an einen Isolator: Bei Untersuchungen mit statischer Elektrizität (niederer Spannung) verlangt man von ihm, daß sein Ohmscher Widerstand außerordentlich groß ist, ferner, daß er möglichst wenig Elektrizität auf seiner Oberfläche aufspeichert um sie nach der Entladung wieder abzugeben. Bei Wechselstromversuchen dagegen wünscht man in der Regel möglichst hohe Durchschlagsfestigkeit und möglichst geringe dielektrische Verluste, außerdem auch ein gewisses Maß von mechanischer Festigkeit sowie nicht allzuhohen Preis; die Forderung nach einem extrem hohen Ohmschen Widerstand tritt dagegen mehr in den Hintergrund. Paraffin z. B., einer der besten statischen Isolatoren, ist in Wechselfeldern fast unbrauchbar. Für letzteren Zweck hat die elektrotechnische Industrie im vergangenen

Jahrzehnt eine lange Reihe von Isolierstoffen hergestellt, für die Angaben über Zusammensetzung und spezifischen Widerstand kaum erhältlich sind. Erwähnt seien die viel benutzten Fabrikate „Bakelit“ (Bakelit-Ges. Berlin; vgl. S. 358), „Pertinax“ (1 mm Durchschlagsspannung. 25 000 Volt) und „Exzelsiorpapier“ (0,0025—0,08 mm dick) von Meierowski & Co. in Pforz a. Rhein, „Idonit“ sowie die verschiedenen Transformatoröle[1]).

Im folgenden sind einige Isolationsmaterialien, die sich im Laboratorium bewährt haben, angegeben, einigermaßen nach steigender Güte geordnet. Der Widerstand des Zentimeterwürfels, der wohl am besten den Isolator charakterisiert, kann bei verschiedenen Proben desselben Materials sehr stark, um das Tausendfache, schwanken, z. B. bei Glimmer. Um einen Anhaltspunkt zu geben, sind die ungefähren Werte — meist nach den sorgfältigen Messungen von Curtis[2]) — beigefügt.

Bei Ableitung durch einen Widerstand von 10^{10} Ohm brauchen die Blättchen eines Elektroskopes ca. 1 Sekunde, um zusammenzufallen.

a) Paraffiniertes Holz. Besonders geeignet ist Weißbuchenholz, doch genügen auch alle anderen Holzarten. Das Paraffin darf oft gebraucht und durch Verunreinigungen gebräunt sein. Wesentlich ist Erhitzen auf mehr als 100°, bis das geschmolzene Paraffin zu rauchen beginnt. Es tritt dann aus den untergetauchten und öfters gewendeten Holzstücken in großen Mengen und lange Zeit ($^1/_2$ Stunde) Luft und Wasserdampf aus, so daß das Paraffin schäumt. Erst wenn die Gasentwicklung nahezu aufgehört hat, stellt man die Heizung ab, läßt langsam erkalten und nimmt das Holz, wenn das Paraffin zu erstarren beginnt, heraus. So behandeltes Holz, das sich übrigens durch Reiben mit einem Tuchballen schön polieren läßt, hat einen Widerstand von ca. 10^{10} $\Omega \cdot$ cm.

b) Glas. Der Widerstand von Glas beträgt 10^{10}—10^{14} Ω cm. Am besten isoliert das schwerschmelzbare Verbrennungsröhrenglas. Angaben über das Isolationsvermögen des bekannten „Minos“-Glases von Schott & Gen., das vorzugsweise als Dielektrikum für Kondensatoren verwendet wird, waren nicht zugänglich. Nach der Druckschrift von Schott besitzt es eine Durchschlagsfestigkeit von 50 000 Volt/mm, eine Dielektrizitätskonstante von 8,5 und „nur geringe Leitfähigkeit“.

Die meisten Glasarten neigen zur Bildung einer hygroskopischen, leitenden Oberflächenschicht, die für einige Zeit durch Behandlung mit heißem und Abspülen mit destillierten Wasser, für immer durch nachträgliches Bestreichen mit Schellacklösung beseitigt werden kann.

[1]) Vgl. z. B. W. O. Schumann, ZS. f. techn. Phys. 6, 489, 1925.

Der zum Auflösen des Schellacks verwendete Alkohol soll möglichst absolut sein.

c) **Porzellan** hat vor den bisher genannten Isolatoren den wertvollen Vorzug, hohe Temperaturen auszuhalten. Sein Widerstand sinkt dabei allerdings enorm. Er beträgt bei 20° 10^{14}, bei 200° 10^{11}, bei 1000° nur noch 10^{6} Ω cm. — Auf die wichtige Rolle, die es als Isolator in der Technik spielt, braucht nicht hingewiesen zu werden. Für elektrostatische Arbeiten pflegt man es nicht zu verwenden.

Bezugsquelle für Porzellanisolatoren: Hermsdorf-Schomburg, Isolatoren G. m. b. H., Hermsdorf in Thüringen.

d) **Glimmer** ist ein bemerkenswert guter Isolator, ist aber gleichfalls bei Versuchen mit statischer Elektrizität ungebräuchlich. Die Werte, die für seinen Widerstand angegeben werden, schwanken zwischen 10^{13} und 10^{17} Ω cm. Wegen seiner Spaltbarkeit ist er als Material für Kondensatoren unübertroffen. Angaben über die Änderung seines Widerstandes mit der Temperatur scheinen nicht veröffentlicht worden zu sein.

e) **Hartgummi.** Der Widerstand bei Zimmertemperatur beträgt je nach der Güte des Produktes 10^{15}—10^{18} Ω cm. Ähnlich wie bei Glas kann jedoch auch hier die Oberfläche erhebliche Leitfähigkeit zeigen. Die leitende Oberflächenschicht, die besonders bei Belichtung und Feuchtigkeit entsteht, ist reich an schwefliger Säure und kann an ihrem saueren Geschmack erkannt werden. Durch Abbürsten mit Sodalösung und Nachspülen mit destilliertem Wasser, besonders aber durch Abschmirgeln oder Abdrehen kann die Isolationsfähigkeit eines derartigen Stückes außerordentlich vergrößert werden. Um die Länge des Weges auf der Oberfläche zu vergrößern, pflegt man in Hartgummistützen tiefe Rillen einzudrehen. Wenn man die Stützen außerdem noch mit guter [siehe bei b)] Schellacklösung überzieht, sind sie auch für feinere elektrostatische Untersuchungen brauchbar.

f) **Siegellack** hat 10^{15}, **Kolophonium** und **Schellack** 10^{16}, **Paraffin** 10^{17} Ω cm. Letzteres wurde früher viel bei elektrostatischen Arbeiten benutzt, es hat aber den Nachteil, einen Teil der Ladung aufzusaugen, um ihn später, wenn die Spannung gesunken ist, wieder abzugeben. Oberflächenleitung ist dagegen nicht vorhanden, wenn man den Isolator nicht durch Anfassen verunreinigt hat.

g) **Quarzglas** ist ein vorzüglicher, auch bei höherer Temperatur noch brauchbarer Isolator. Sein Widerstand ist bei Zimmertemperatur 10^{18}, bei 200° 10^{11}, bei 700° $3 \cdot 10^{7}$ Ω cm. Seine Durchschlagsfestigkeit

nischer **Quarz** soll parallel zu seiner optischen Achse geschnitten sein; er isoliert dann 200 mal so gut (Widerstand $10^{16}\,\Omega$ cm), als senkrecht zur Achse geschnitten (Kraftlinien parallel zur Achse!).

h) **Schwefel** ist ein vorzüglicher Isolator und kann als Stützisolator für Elektrometer sehr empfohlen werden, da er bei höchstem Widerstand ($10^{18}\,\Omega$ cm) leicht bearbeitbar und billig ist. Nach GEIGER und MAKOWER[4]) schmilzt man kristallinischen Schwefel bei möglichst niedriger Temperatur und gießt ihn in ein reines Glasröhrchen. Der Schwefel zieht sich beim Erstarren so weit zusammen, daß sich das gegossene Stück nach einigen Stunden aus dem Rohr herausziehen läßt. Drahtdurchführungen können mit eingegossen werden. Die Güte der Isolation nimmt während der ersten Stunden merklich zu. Da Schwefel seinen Widerstand bei Belichtung verringert (ähnlich wie Selen und Tellur) müssen die Isolatoren vor starker, andauernder Beleuchtung geschützt werden.

i) **Bernstein.** Der natürliche Bernstein und der durch Pressen gewonnene, z. B. von den Preußischen Bernsteinwerken in runden Stangen von 6—64 mm Durchmesser hergestellte Preßbernstein, scheinen in neuerer Zeit für die Zwecke der Isolation feiner Elektrometer usw. alle anderen Isolatoren zu verdrängen. Zwar zeigen auch Bernstein und Schwefel das bei Paraffin beschriebene Aufsaugen einer Ladung, jedoch in kaum merkbarer Weise. Der billigere Preßbernstein steht dem natürlichen als Isolator nicht merklich nach. Leider scheinen Messungen über den Isolationswiderstand von Bernstein nicht vorzuliegen. CURTIS (l. c.) gibt nur den Widerstand von „Ambroin", das ein ähnliches Produkt wie Preßbernstein sein dürfte, zu $10^{16}\,\Omega$ cm an. — Bernstein läßt sich feilen und drehen, nur seine Sprödigkeit stört etwas bei seiner Verarbeitung.

Bezugsquelle: Preußische Bergwerks- und Hütten A.-G., Königsberg I, Sattlergasse 6.

9. Widerstände von 10^6 bis 10^{12} Ohm.

Geradeso, wie bei den gebräuchlichen Widerständen von 10—100 Ohm muß man auch bei den hochohmigen Widerständen unterscheiden zwischen den Typen, die nur dazu dienen, die Stromstärke nicht über ein vorgeschriebenes Maximum hinaus anwachsen zu lassen, und den **Meßwiderständen**. Von letzteren verlangen wir zeitliche Unveränderlichkeit und einen möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten. Während diese Anforderungen bei Rheostaten mit aufgespulten Manganindrähten

---

4) H. GEIGER und W. MAKOWER, Meßmethoden auf dem Gebiete der Radio-

im höchsten Grade erfüllt sind, dürfte das Problem, Präzisionswiderstände von vielen Megohm herzustellen, die aus Draht zu kostspielig würden, noch nicht eindeutig gelöst sein Hochohmige Vorschaltwiderstände dagegen, bei denen es nicht so sehr auf Konstanz ankommt, sind nach verschiedenen Methoden leicht im Laboratorium herstellbar und auch käuflich.

a) Silitwiderstände. Die von der Firma „Gebr Siemens & Co." in Handel gebrachten Silitwiderstände bestehen aus Stangen von 1—2 cm Durchmesser und 10—30 cm Länge und ihr Widerstand variiert von 0,02—10^7 Ohm. Sehr gefährlich ist aber die „fallende Charakteristik" des Silit. Mit steigender Temperatur verringert es seinen Widerstand enorm stark. Wenn daher die Belastung dieser Widerstände so groß ist, daß sie einigermaßen warm werden, so lassen sie mehr Strom durch, was eine weitere Widerstandsverringerung und nach kurzer Zeit Aufglühen und Zerstörung des Silitstabes zur Folge hat. Man muß daher, wenn immer es sich um Abdrosselung einer einigermaßen leistungsfähigen Energiequelle handelt, nach dem Einschalten Strommesser und Widerstand sorgfältig beobachten, bis man annehmen darf, daß sich die stationäre Temperaturverteilung eingestellt hat Andererseits ist es natürlich ganz unbedenklich, etwa einen 2-Volt-Akkumulator durch ein Silitstäbchen von 10^6 Ω zu schließen.

Bezugsquelle. Gebr. Siemens & Co.. Berlin-Lichtenberg, Herzbergstr. 128.

b) Dünne Schichten eines Leiters auf einem Isolator. Graphitwiderstände kann man erzeugen durch Anbringung eines mindestens 2 mm breiten, möglichst kräftigen (glänzenden) Bleistiftstriches auf mattiertem Glas, das nachträglich schellackiert wird. Das Verfahren ist in den „Technischen Kunstgriffen" (l. c. Fußnote S. 347) ausführlich beschrieben. Derartige Widerstände sind leicht herzustellen und (mittels eines eingeschalteten Galvanoskopes) abzustimmen. Sie haben jedoch einen sehr großen Temperaturkoeffizienten (ca. 1% pro Grad) und ihre zeitliche Konstanz ist für Messungen wohl ungenügend.

Tuschewiderstände nach Auer[5]) bestehen aus Überzügen von Zeichentusche auf Papier oder Asbest; sie können kontinuierlich von 10^4—10^{10} Ω variabel hergestellt und bis zur Rotglut beansprucht werden. Kost[6]) überzieht Tonzylinder mit einer breiigen Mischung von Graphitpulver und Tusche und erhält so Widerstandseinheiten von $2 \cdot 10^3$ bis $2 \cdot 10^5$ Ω. Alle diese Widerstände dürften gleichfalls die oben angeführten Nachteile besitzen. Bedenklich ist auch der Kontakt der Strom-

5) A. Auer, Phys. 78, 19, 782, 1911

zuführungen. — Auch Tuschestangen selbst sind nach KOST (l. c.) als Widerstände brauchbar. Ein Stück Tusche von $1 \times 1 \times 5$ cm hatte $10^6\ \Omega$.

Technische Ausführungen von Widerständen dieser Klasse wurden von SKAUPY und EWEST[7]) sowie von LILIENFELD und HOFMANN[8]) angegeben Letztere stellen unter der Bezeichnung „Multohm II" Widerstände bis zu $10^9\ \Omega$ mit einem Temperaturkoeffizienten von nur 0,2 $^0/_{00}$ pro Grad her.

Vielleicht die besten Widerstände dieser Art sind die durch Kathodenzerstäubung hergestellten. Gegen ihre Verwendung als Präzisionswiderstände besteht jedoch folgendes Bedenken. Berechnet man die Schichtdicke einer durch Bestäubung erhaltenen leitenden Oberfläche z. B. aus Platin (spez. Widerstand: $1 \cdot 10^{-1}$), die bei 1 cm Breite und 10 cm Länge einen Widerstand von $10^8\ \Omega$ besitzt, so findet man Dicken, die viel kleiner als 1 Atomdurchmesser sind. Der Mechanismus der Stromleitung in solchen Schichten, die vermutlich aus voneinander getrennten Atomhäufchen bestehen, ist schwer vorstellbar. Vielleicht kommt von dieser Oberflächenstruktur die merkwürdige Erscheinung, daß der Temperaturkoeffizient des Widerstandes bei sehr dünnen Schichten negativ ist und bei steigender Dicke durch Null gehend allmählich den positiven Wert des massiven Metalls annimmt, ferner das Ergebnis einer Arbeit von A. RIEDE[9]), daß der spezifische Widerstand bei Abnahme der Schichtdicke abnorm stark wächst.

Zur Herstellung der zerstäubten Schichten benutzt man einen Apparat ähnlich, wie er in Fig. 13, S 383 gezeichnet ist, oder eine drahtförmige Kathode Als Träger der Schicht wird Glas, besser Quarzglas (Quarzfäden!) oder Bernstein verwendet. Bei Glas und Quarzglas versieht man die Enden mit Armaturen aus eingebranntem Platin oder Gold (S. 380) und lötet die Zuführungsdrähte an. Als Material für die Schicht empfiehlt sich Platin wegen seiner chemischen Unangreifbarkeit oder Palladium, das besonders gut zerstäubt, oder Manganin bzw. Konstantan[10]). Bemerkenswerterweise zerstäuben diese als Legierungen d h. die zerstäubte Schicht hat (ungefähr) dieselbe Zusammensetzung der Komponenten wie das Ausgangsmaterial, und daher auch seinen hohen spezifischen Widerstand und seinen geringen Temperaturkoeffizienten.

Derartige Widerstände von 10^7—$10^9\ \Omega$ werden hergestellt z. B. von der Owin Radio-Apparate-Fabrik Hannover, Talstraße 6, unter der Bezeich-

---

[7]) F. SKAUPY und H. EWEST, ZS. f. techn. Phys. 1, 167. 1920.

[8]) J. E. LILIENFELD und W. HOFFMANN, ETZ. 41, 870. 1920.

[9]) A. RIEDE, ZS. f. Phys. 28, 177. 1924. Vgl. auch S. S. MACKEOWN, Phys. Rev. 21, 708. 1923.

nung „Leithäuser Hochohmwiderstände“. Temperaturkoeffizient negativ, zwischen 0,2 und 2 Promille pro Grad.

c) Halbleiter. Hochohmige Widerstände aus sog. Halbleitern (Holz, manche Sorten Zelluloid, Metalloxyde) scheinen nicht gebräuchlich zu sein, obwohl ein Versuch a priori nicht aussichtslos sein dürfte. In einer schon mehr als 20 Jahre zurückliegenden Arbeit stellte VOIGT[11]) aus einem in eine Mischung aus Paraffin und Wachs eingegossenen Stab aus trockenem Ahornholz von 120 cm Länge und 7 mm Dicke einen Widerstand von 10^{10} Ω her, der für Hochspannungsversuche benutzt wurde. Bei einer gelegentlichen Nachprüfung dieser Versuche durch den Verfasser ergab sich eine ganz befriedigende Konstanz des Widerstandes, der z. B. über Nacht an eine 1000-Volt-Batterie gelegt wurde. Sein Temperaturkoeffizient war allerdings ziemlich hoch.

d) Flüssigkeitswiderstände. Folgende Flüssigkeiten sind gebräuchlich:

Mannit-Borsäure nach MAGNANINI	Zentimeterwürfel	1 300 Ω
Jodcadmium-Amylalkohol n. HITTORF	„	25 000 Ω
Xylol-Alkohol nach CAMPBELL	„	10^{10} Ω
Jod in Benzin nach ROLLEFSON	„	$1-5 \cdot 10^{11}$ Ω

Bei allen Flüssigkeitswiderständen liegt die Möglichkeit vor, daß sich die Elektroden durch den Stromdurchgang polarisieren, eine Fehlerquelle, die zwar ihre Verwendung als Vorschaltwiderstände bei hohen Spannungen kaum beeinträchtigt, die aber sorgfältig beachtet werden muß, wenn man Meßwiderstände parallel zu einem Elektrometer bei sehr kleinen Spannungen benutzt.

Die Magnaninilösung[12]) stellt man her, indem man 121 g Mannit, 41 g Borsäure und 0,06 g Chlorkalium in destilliertem Wasser löst und auf 1 l verdünnt. Sie zeichnet sich durch ihren kleinen Temperaturkoeffizienten aus: 2 Promille pro Grad. Aus dem oben angegebenen spez. Widerstand folgt, daß eine Kapillare von 1 mm^2 Querschnitt und 1 m Länge einen Widerstand von $1{,}3 \cdot 10^7$ Ω ergibt. Die Polarisation der Elektroden kann hier durch Verwendung sog. „unpolarisierbarer Elektroden“ vermieden werden, die POHL und PRINGSHEIM[13]) für Meßzwecke empfehlen, die aber immerhin eine wesentliche Komplikation in der technischen Anwendung des Widerstandes darstellen.

---

[11]) E. VOIGT, Ann. Phys. 12, 385. 1903.
[12]) C. MAGNANINI, Rend. della R. Accad. dei Lincei 6, 260. 1890.
[13]) R. POHL und P. PRINGSHEIM, „Die lichtelektrischen Erscheinungen“ Samm-

Jodcadmium-Amylalkoholwiderstände nach HITTORF[14]) waren früher als Vorschaltwiderstände bei Untersuchungen mit Gasentladungen sehr beliebt. Man pflegt einen Satz von $^1/_2$ m hohen U-Rohren herzustellen und die groben Änderungen des Widerstandes durch wahlweises Parallel- oder Hintereinanderschalten, die feinen durch mehr oder minder tiefes Einsenken der Elektroden zu besorgen. Die Elektroden bestehen aus amalgamierten, dicken Cadmiumdrähten oder aus flüssigem Cadmiumamalgam, die Flüssigkeit aus nahe konzentrierter Lösung von Jodkadmium in Amylalkohol.

Xylol-Alkoholwiderstände scheinen in letzter Zeit als Meßwiderstände bevorzugt zu werden, obwohl sie nicht mit Sicherheit frei von Polarisation sind[15]). Bei schwachen Strömen dürften jedoch reichlich dimensionierte, mit Platinschwarz überzogene Platinelektroden eine merkliche Polarisation nicht aufkommen lassen. CAMPBELL[16]) gibt folgendes Herstellungsverfahren an: Technisches Xylol und absoluter Alkohol werden ca. 15 Stunden im Exsikkator über metallischem Kalzium getrocknet[17]), dann im Verhältnis 9 Xylol : 1 Alkohol gemischt und sofort in das Widerstandsgefäß eingefüllt, das dann zugeschmolzen wird. Die Oberflächenleitung des Glasgefäßes, die von derselben Größenordnung sein kann, muß in geeigneter Weise (schellackieren, S. 358; Trockenkasten) unterdrückt werden. — Der Temperaturkoeffizient dieser Widerstände ist erheblich: Zwischen t = 15° bis 30° ist der Widerstand:

$$R_t = R_{20} [1 - 0{,}014 (t - 20)].$$

Eine Lösung von Jod in gereinigtem Benzin wird von ROLLEFSON[18]) in einer kurzen Arbeit als Meßwiderstand (für Elektrometer) empfohlen. Die spezifischen Widerstände von 2—10 proz. Lösungen liegen zwischen 1 und $5 \cdot 10^{11}$ Ω, ihr Temperaturkoeffizient beträgt etwa 1% pro Grad, also nicht viel weniger wie bei Xylol-Alkohol. Ein Urteil über die Güte dieser Widerstände wird man sich erst, wenn weitere Erfahrungen darüber vorliegen, bilden können.

14) W. HITTORF, Wied. Ann. 7, 553. 1879. Vgl. auch J. STARK, „Die Elektrizität in Gasen". Leipzig, J. A. Barth. 1908.

15) R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verh. d. D. Phys. Ges. 15, 173. 1913.

16) N. CAMPBELL, Phil. Mag. 23, 668. 1912.

17) Bei den Durchschlagsversuchen von SCHUMANN (Fußnote S. 415) zeigte sich, daß die letzten Spuren von Feuchtigkeit aus Xylol erst verschwinden, wenn es wochenlang mit metallischem Natrium in Berührung steht. Wie sein Widerstand dadurch beeinflußt wird, scheint noch nicht untersucht zu sein.

e) Bronsonwiderstände Bronson[19]) hat vorgeschlagen, ein ionisiertes Gas als hochohmigen Widerstand zu verwenden. Die früher besonders bei radioaktiven Messungen sehr beliebten „Bronsonwiderstände" bestehen aus einer kleinen Kammer (Messingbüchse), welche die eine Elektrode bildet, während die andere durch Bernstein hochisoliert eingeführt wird. Die Ionisierung der Luft bewirkt man durch ein radioaktives Präparat, einen Poloniumniederschlag, dessen Wirksamkeit aber bekanntlich in 136,5 Tagen auf die Hälfte sinkt, oder Uranoxyd, das man auf den Boden der Messingbüchse streut Bekanntlich folgt die Leitung durch ein ionisiertes Gas nicht dem Ohmschen Gesetz (Sättigungsstrom, d. h. der Widerstand scheint sich bei höheren Spannungen zu vergrößern); bei sehr kleinen Spannungen, wie sie bei einem dem Elektrometer parallel geschalteten Meßwiderstand in Frage kommen, sind die Abweichungen jedoch minimal. Hingegen kann der Voltaeffekt der Zelle stören, der darin besteht, daß sich zwischen den Polen der Bronsonzelle eine Potentialdifferenz von 1—2 Volt ausbildet; diese kann evtl durch eine gegen-elektromotorische Kraft kompensiert werden. — Beim Studium der neueren Literatur hat man den Eindruck, daß die Bronsonwiderstände „aus der Mode gekommen seien".

Meßtechnische Fragen, die mit dem hier behandelten Gebiet zusammenhängen — Isolatoren, Widerstände, Elektrometerschaltungen und ähnliches — sind eingehend in dem früher (Fußnote S. 417) zitierten Buch von Geiger und Makower, „Meßmethoden auf dem Gebiete der Radioaktivität" behandelt. — Elektrische Schaltungen zur Messung hochohmiger Widerstände sind in einer Arbeit von Jaeger und Hinze[20]) angegeben.

Achtes Kapitel.

Thermoelemente.

Die Untersuchungen über die Größe der Thermokräfte zwischen verschiedenen Metallen und Legierungen sind an anderer Stelle dieses Werkes behandelt. Es sei daher hier nur auf einige wichtige einschlägige Arbeiten hingewiesen.

E. Becquerel, Ann. de chim et phys (4) 8 1866.

J. Weiss und J. Königsberger, Phys. ZS. 10. 956. 1909.

W. Haken, Ann. Phys. 32, 291 1910.

A. Eucken und G Gehlhoff, Verh. d. D phys. Ges 14, 100. 1912.

F Fischer und G. Pfleiderer, Gesammelte Abhandl. des Kaiser-Wilhelm-Institutes zur Kenntnis der Kohle, 4, 441. 1920.

[19]) H L. Bronson, Amer. journ of science 19, 185. 1905. Phil. Mag. 11, 143. 1906.

Die folgende Tabelle gibt die thermoelektrischen Potentialdifferenzen zwischen gebräuchlichen Metallkombinationen bei Zimmertemperatur in Mikrovolt (10^{-6} Volt) pro Grad an:

Platin	— Platin + 10% Rhodium	6,4
Konstantan	— V_2A (Edelstahl)	40
Konstantan	— Kupfer	41
Konstantan	— Manganin	41
Konstantan	— Eisen	53
Konstantan	— Chromnickel	50
Konstantan	— Chronin	50
Wismut	— Eisen	92
Wismut	— Antimon	100
95 Bi, 5 Sn	— 97 Bi, 3 Sb	120
Tellur	— Nickel	330—520
Tellur	— Platin	ca. 500
Tellur	— Wismut	500—550

Da die Thermokraft mancher Kombinationen von kleinen Verunreinigungen und vom Metallgefüge stark beeinflußt wird, geben diese Zahlen allerdings nur einen ersten Anhaltspunkt.

1. Thermoelemente für Temperaturmessungen.

Thermoelemente sind den Quecksilber- oder Gasthermometern in folgenden Punkten überlegen: Sie gestatten Fernablesung; der temperaturempfindliche Teil kann bei ihnen auf ein Volumen von Bruchteilen eines Kubikmillimeters reduziert und die Genauigkeit durch Wahl des Galvanometers in weiten Grenzen variiert werden; ihr Meßbereich ist wesentlich größer, als der eines Quecksilberthermometers.

Die Technik der Messung hoher Temperaturen mit Thermoelementen dieser Gattung hat HENNING[1]) ausführlich beschrieben. Die übliche Schaltung eines einzelnen Elementes ist in Fig. 23a, eine auf dasselbe hinauskommende Schaltung, die sich besonders für Kupfer-Konstantanelemente eignet, in Fig. 23b skizziert. Der Kupferdraht ist durch —, der Konstantandraht durch = bezeichnet. Die Lötstelle A bringt man auf die zu messende Temperatur, B hält man auf definierter Temperatur (Eis; für rohe Messungen Zimmertemperatur). Man mißt entweder die Spannung zwischen den Klemmen bei B mittels einer Kompensationsmethode, oder die Stromstärke mittels eines Galvanometers. Die zweite Methode ist die bequemere und häufiger angewandte, doch muß man bei ihr dafür sorgen, daß der Widerstand der Thermoelementdrähte merklich konstant bleibt, bzw. gegen den Gesamtwiderstand des Schließungskreises zu vernachlässigen ist. Aus diesem Grunde verdient die

[1]) F. HENNING, „Die Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Temperatur-

Kombination Kupfer-Konstantan den Vorzug vor Eisen-Konstantan, obwohl letztere etwas höhere Thermokraft besitzt, denn das Kupfer mit seinen großen Temperaturkoeffizienten liefert wegen seiner großen

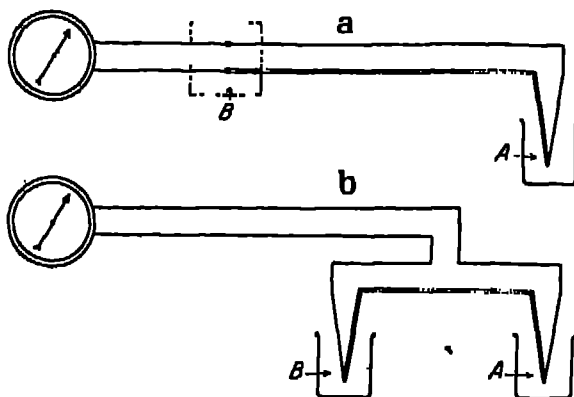



Fig. 23 Thermoelementschaltungen.

Leitfähigkeit nur einen kleinen Beitrag zum Widerstand, das Konstantan dagegen ist fast temperaturunempfindlich.

Eine praktische Kompensationsschaltung wurde von St. Lindeck[1]) angegeben (Fig. 24). R ist ein fester Widerstand von 0,01 Ω, W ein Schieberwiderstand von etwa 2000 Ω. Die beiden Widerstände werden von dem mit dem Milliamperemeter M gemessenen Strom des Akkumulators E durchflossen. Das Thermoelement T liegt parallel zu R. — Man reguliert W, bis das empfindliche Galvanometer G stromlos ist, und liest die Stromstärke bei M ab. Bei R = 0,01 Ω entspricht 1 Milliampere einer Klemmenspannung von 10 Mikrovolt.

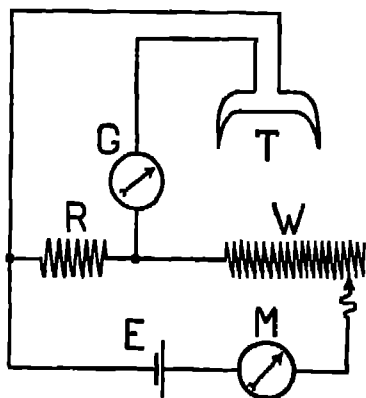



Fig. 24. Kompensationsschaltung.

Gebräuchliche Kombinationen für derartige Thermoelemente sind:

a) Konstantan-Kupfer wird für tiefe und mittlere Temperaturen vorzugsweise verwendet, da es eine ziemlich hohe Thermokraft besitzt und da, wie oben erwähnt, sein Widerstand nur wenig von der Temperatur abhängt (Strommessung). Seine thermoelektrische Kraft läßt sich in dem Bereich von 0 bis + 306° mit erheblicher Genauigkeit durch eine Gleichung dritten

[1]) St. Lindeck, ZS. f. Instr. 19, 249. 1899.

Grades ausdrücken. Das Element ist brauchbar von — 250 bis + 400°. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt gibt für ein derartiges Element, dessen eine Lötstelle auf 0° gehalten wurde, folgende Thermokräfte in Millivolt an[8]:

— 185°	— 80°	0,0°	+ 100°	+ 200°	+ 300°	+ 400°	+ 500°
5,0	2,7	0	4,1	8,8	14,1	19,0	26,3

Sehr angenehm zur Anfertigung dieser Elemente sind die von Siemens & Halske hergestellten Kupfer-Konstantandrähte, die erst einzeln und dann gemeinsam mit Seide umsponnen sind.

Es sei erwähnt, daß man den Konstantandraht nicht etwa durch einen Manganindraht ersetzen darf. Manganin hat eine besonders kleine Thermokraft gegen Kupfer.

b) Konstantan - Chromnickel (85,3 Ni, 12,5 Cr, Rest meist Fe) ist bei höheren Temperaturen dem Konstantan-Kupfer vorzuziehen, da es eine etwa 1,3 mal so hohe Thermokraft besitzt und bis 900° benutzt werden kann[8]. Die Lötung läßt sich gut mit reinem Gold ausführen.

c) Platin - Platinrhodium (90% Pt, 10% Rh.). Brauchbar von 300—1700°. Die Angaben verschiedener Elemente sind so gut reproduzierbar, daß diese Metallkombination als Normalelement für Präzisionsmessungen über 500° unentbehrlich geworden ist. Zwischen 300 und 1600° wird seine Thermokraft mit großer Genauigkeit durch eine Gleichung dritten Grades dargestellt, deren Koeffizienten durch Beobachtungen bei den Schmelzpunkten von Cadmium, Antimon, Gold und Palladium bestimmt werden. Das Element gibt, wenn sich die eine Lötstelle auf 0° befindet, bei den Temperaturen

500	1000	1500	1700 Grad C.
4,17	9,56	15,45	17,81 Millivolt.

Über Vorsichtsmaßregeln beim Gebrauch des Elementes bei hohen Temperaturen (Schutz vor Heizgasen, vor zerstäubendem Iridium und Rhodium) vgl. HENNING (l. c. Fußnote S. 423). Fertige Elemente können von Heraeus bezogen und von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeicht werden.

Heraeus stellt auch Thermoelemente aus „Legierungen der Platinelemente und Gold" her, die bis 1200° brauchbar sind; sie besitzen die etwa fünffache thermoelektrische Kraft wie die Platin-Platinrhodiumelemente und sind bei gleicher Haltbarkeit wesentlich billiger als diese. Ferner liefert er „Platinersatzelemente" aus unedlen Metallen, welche fast dieselbe Thermokraft wie das Platin-Platinrhodium besitzen (so

---

[8]) Nach: L. HOLBORN, K. SCHEEL und F. HENNING, „Wärmetabellen der

daß die in Celsiusgraden geeichten Galvanometerskalen der letzteren beibehalten werden können). Diese Elemente sind allerdings nur für Temperaturen unter 1000° brauchbar.

d) Wolfram-Molybdän. Die Kombination der beiden Metalle, die den höchsten Schmelzpunkt besitzen, gestattet bis etwa 2300° vorzudringen. Leider ist die Thermokraft hier eine komplizierte Funktion der Temperatur. Sie steigt zu einem Maximum von 12,5 Millivolt bei 540° an, nimmt mit steigender Temperatur wieder ab und geht bei 1500° durch Null hindurch zu negativen Werten. Diese Angaben sind einem kurzen Vortrag von C. G. FINK von der General Elektric Comp. Harrison NY (1912) entnommen[4]. Neuere Versuche mit diesem Element, das sich in einer Wasserstoffatmosphäre durch absolute Beständigkeit auszeichnen soll, sind anscheinend nicht publiziert worden.

Es sei daran erinnert, daß man die Thermokraft durch Hintereinanderschaltung zahlreicher Elemente vervielfachen kann (Fig. 25). Dies empfiehlt sich besonders auch, wenn man den Mittelwert der Temperatur in einem Raum benötigt. Bei höheren Temperaturen bereitet die gegenseitige Isolation der Lötstellen einige Schwierigkeiten. Bis höchstens 150° ist Bakelit (vgl. S. 358) sehr brauchbar. — Die Herstellung einer derartigen Thermobatterie ist ausführlich in den „Technischen Kunstgriffen" (vgl. Fußnote S 347) beschrieben.

2. Thermoelemente für Strahlungsmessungen.

Die im 1. Abschnitt beschriebenen Thermoelemente werden in solchen Fällen benutzt, bei denen die zur Verfügung stehende Wärmemenge groß ist gegen die von der Lötstelle aufgenommene. Die Lötstelle wird sich daher in kurzer Zeit auf die zu messende Temperatur erwärmen. Anders liegen dagegen die Verhältnisse, wenn, bei der Messung einer Strahlung, nur sehr geringe Wärmeenergie zur Verfügung steht. Da die Galvanometerablenkung bei gegebener Thermokraft der Temperaturdifferenz der Lötstellen proportional ist, müssen wir das Element so konstruieren, daß die Lötstelle durch die auffallende, oft sehr schwache Strahlung möglichst stark erwärmt wird, so also, daß „die Strahlungsempfindlichkeit" möglichst groß wird. Ferner ist anzustreben, daß schon nach wenigen Sekunden ein Wärmegleichgewicht erreicht ist, damit die Einstelldauer kurz werde.

Auch hier werden häufig mehrere Elemente zu einer „Thermosäule" hintereinandergeschaltet, wie dies in Fig. 26 angegeben ist. Die über s liegenden Lötstellen werden der Strahlung ausgesetzt, die

[4] C. G. FINK, ZS. f. [illegible]

über u vor Strahlung geschützt. Die Fläche der s-Lötstellen wird meist durch kleine, aufgelötete, nachträglich geschwärzte Silberplättchen vergrößert, bei u dagegen sind die Drähte an dicke, voneinander isolierte Kupferklötze gelötet, so daß diese Stellen die Temperaturschwankungen von s nicht mitmachen.

Während die alte, würfelförmige Thermosäule von MELLONI (1835) noch sehr geringe Strahlungsempfindlichkeit besaß, wurden später von PASCHEN (1893) und von RUBENS (1898) schon sehr brauchbare Säulen konstruiert und mit den steigenden Anforderungen der Ultrarot-Spektroskopie, für die ein möglichst empfindliches Meßinstrument eine Lebensfrage ist, häuften sich die Veröffentlichungen über hochempfindliche Thermosäulen

Eine eingehende, theoretische und experimentelle Untersuchung über dieses Thema, deren Studium vor der Anfertigung eines solchen Instrumentes sehr zu empfehlen ist, stammt von JOHANSEN[8]).

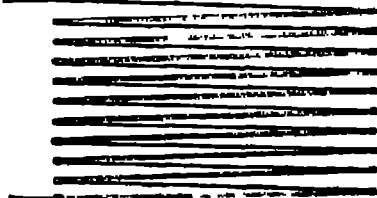



Fig. 25 Hintereinanderschaltung von Thermoelementen.

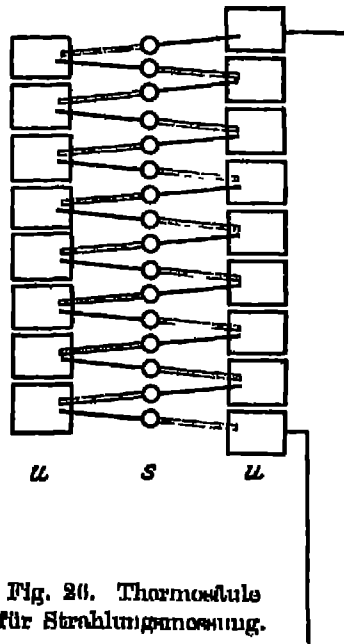



Fig. 26. Thermosäule für Strahlungsmessung.

Um die Strahlungsempfindlichkeit möglichst zu steigern, soll

1. Die Thermokraft der kombinierten Metalle möglichst groß,

2. die Masse von Lötstellen und Drähten möglichst klein sein.

3. Der Widerstand der Thermosäule sei gleich dem des benutzten Galvanometers.

4. Der Wärmeverlust durch die die Lötstellen umgebende Luft soll möglichst gering,

5. der Wärmeverlust durch Ableitung durch die Drähte ebensogroß sein, wie der Wärmeverlust durch die Ausstrahlung der Lötstellen.

6. Die Durchmesser der beiden Drähte sollen so gewählt werden, daß das Verhältnis zwischen der Wärmeableitung und dem elektrischen Widerstand für beide gleich groß ist.

Zu 1. und 2. Thermoelektrische Potentiale verschiedener Metallkombinationen sind in der Tabelle S. 423 zusammengestellt. Zur Behandlung dünner Drähte siehe S. 408; eine Lötvorrichtung hierfür ist in Fig. 7 S. 353 abgebildet.

Leider sind gerade die Metalle und Legierungen, die sich durch besonders hohe Thermokraft auszeichnen, sehr spröde und deshalb nicht in Drahtform erhältlich. Während manche Konstrukteure größeren Wert auf einige mechanische Festigkeit der Säule legen und dafür auf hohe Thermokraft verzichten, nehmen andere die Zerbrechlichkeit, bzw. größere Metallquerschnitte in Kauf, um die thermoelektrisch empfindlichsten Metalle verwenden zu können. Die Drähte sind ja bei Elementen dieser Art sehr kurz, oft nur wenige Millimeter lang.

Um feine Drahtstückchen von den spröden, aber relativ leicht schmelzenden Metallen herzustellen, gibt es zwei Methoden. Die auf S. 408 beschriebene von TAYLOR, über die wohl noch wenig Erfahrungen vorliegen. Einen anderen, leicht auszuführenden Kunstgriff hat PFUND[6]) angegeben. Man bereitet vor: Ein Porzellanschälchen mit Griff; eine 5—10 mm dicke, etwa 50 × 50 cm große Glasplatte. 5—10 g Metall werden in der Schale geschmolzen und tangential auf die Glasplatte geschleudert. Das Metall erstarrt dort momentan zu einem „Klex", von dem zahlreiche feine Fäden ausgehen. Von diesen sucht man geeignete Stückchen aus, schneidet sie mit einem feinen Messer durch und hebt sie mit einer Pinzette vom Glas ab. PFUND schreibt weiter: „Viele dieser Fäden waren zu dünn, um überhaupt behandelt werden zu können. Die tatsächlich benutzten waren ungefähr 0,15 mm breit und 0,01 mm dick. Nach vielen vergeblichen Versuchen ergab sich folgendes, sehr befriedigende Lötverfahren. Zwei aus den beiden Legierungen gewonnene Fadenenden (Länge etwa 5 mm) wurden hintereinander auf ein Stück Glas gelegt, unter das ein Stück weißes Papier gelegt worden war. Dann wurde ein ganz kleines Stück Lötmetall von niederem Schmelzpunkt auf einem Glasstreifen (von 1 × 5 × 40 mm) geschmolzen. Dieses Stückchen geschmolzenen Lotes wurde mit etwas nichtätzendem Lötwachs bedeckt, worauf sich das Lot zu einem winzigen Kügelchen zusammenzog. Der Glasstreifen wurde umgekehrt und das geschmolzene Kügelchen unmittelbar über die Berührungsstelle der beiden Fäden gebracht, so daß es diese berührte. Sobald das Kügelchen fest geworden war — was sich durch Beobachtung des Augenblicks feststellen ließ, in dem das Metall eine weißliche Färbung annahm —, wurde ein Druck auf den Glasstreifen unmittelbar über dem Kügelchen ausgeübt, und zwar mit der Spitze einer Messerschneide; auf diese Weise wurde das

Kügelchen zu einer ganz dünnen Scheibe (von ungefähr 1 mm Durchmesser) ausgepreßt, in die die Fäden eingebettet waren. Die Oberseite jedes Scheibchens wurde geschwärzt."

Zu 4. Die Strahlungsempfindlichkeit von Thermoelementen läßt sich durch Evakuieren wesentlich [z. B. bis zum 50fachen][7]) steigern. Der Gewinn ist um so größer, je kleiner die Wärmeableitung durch die Drähte im Vergleich zu der durch die Luft ist. Das Evakuieren bedingt jedoch ein für die Strahlung durchlässiges Fenster vor den Lötstellen. Lassen wir zu, daß 10% der Strahlung absorbiert werden und machen die Annahme, daß das Fenster 2 mm dick sei, so kommt man mit den unten angegebenen Materialien bis zu folgenden Maximalwellenlängen:

Glas	1,5 μ	Steinsalz	17 μ
Quarz	3 μ	Sylvin	20 μ
Flußspat	9 μ		

Leider sind Steinsalz und Sylvin nicht sehr beständig, sie werden vielmehr durch die Luftfeuchtigkeit angegriffen. Man muß daher Fenster aus diesen Materialien entweder bei Nichtgebrauch durch Trocknung mit Phosphorpentoxyd oder metallischem Natrium, oder durch einen Lackanstrich schützen. Als Lack wird eine Lösung von Schießbaumwolle in Amylacetat empfohlen, die jedoch einen Absorptionsstreifen im Ultrarot besitzt.

Um die Thermosäule nach dem Evakuieren von der Pumpe trennen und trotzdem, auch wenn sie einige Monate lang nicht gebraucht war, Versuche in sehr hohem Vakuum ausführen zu können, verwendet man zum Evakuieren häufig Kokosnußkohle, die zum Versuch mit flüssiger Luft gekühlt wird. Denn an ein sachgemäßes „Ausheizen" kann schon wegen des aufgekitteten Fensters nicht gedacht werden. In der oben erwähnten Arbeit verwendet PFUND folgendes eigentümliche Verfahren zur nachträglichen Evakuierung: Ein ca. 15 cm langes, vertikales Rohr trägt unten eine Kugel von 4 cm Durchmesser, in die ein 1,5 cm langer Platindraht hineinragt und die zur Hälfte mit gepulverter, auf einem Eisenblech zur Rotglut erhitzter Kokoskohle gefüllt wird. Im oberen Teil des Rohres ist eine Zylinderelektrode aus Aluminium und in dieser eine Wehneltelektrode angebracht. Man evakuiert bis auf einige Millimeter Quecksilberdruck und schickt eine Entladung durch das Rohr, die stark genug ist, einen Teil der Holzkohleteilchen zur Rotglut zu bringen und pumpt die sich entwickelnden Gase ab. Wenn die Gasabgabe gering geworden ist, wird die Entladung unterbrochen, das Rohr maximal evakuiert und abgeschmolzen. Nach der Abkühlung hat sich ein hohes Vakuum gebildet. Hat das Vakuum im Lauf der Zeit nach-

	Material	Fläche mm²	Widerstand Ω	evakuiert?	Galvanom. Ablenkung pro Meterkerze	Einstelldauer Sek.
J. JOHANSEN, Ann. Phys. 33, 517. 1910.	Eisen-Konstantan	2,5	7,3	ja	135	?
	Eisen-Wismut	6,4	8,9	ja	448	?
H. PFUND, Phys. ZS. 13, 870, 1912.	95 Bi + 5 Sn — 97 Bi + 3 Sb	1	5,1	ja	1200	8
WITT, Phys. ZS. 21, 374. 1920.	Bi — Bi + 5 bis 6% Sn	14 × 4	74,5	nein	6800	17
VOEGE, Phys. ZS 22, 119. 1921.	? ?	50	2—3	?	2090	?
	? ?	4	2,8	nein	100	2
	? ?	3,5	0,95	ja	124	21
J. H. MOLL, Proc. Phys. Soc. 35, 257, 1923.	Manganin-Konstantan	314	50	?	(10 000)	2
HASE, ZS. f. Phys. 15, 52. 1923.	? ?	8	7	ja	(3 000)	wenige
HILGER, London, Katalog. „F. 15.“	Wismut-Silber	10 × 1	?	nein	(750)	2,5

gelassen, so genügt es, unter Zuhilfenahme der Wehneltelektrode einige Minuten lang eine kräftige Entladung durch das Rohr zu schicken um wieder ein Vakuum, das einer Parallelfunkenstrecke von 2 cm entspricht, zu erhalten. Diese Evakuierung genügte für mehr als 4 Monate

Zu 6. JOHANSEN berechnet in der erwähnten Arbeit, daß bei einem Durchmesser des Eisendrahtes von 0,023 mm ein Durchmesser des Konstantandrahtes von 0,045 mm, bzw. des Wismutdrahtes von 0,075 mm das Optimum an Empfindlichkeit ergibt. Nimmt man im ersten Fall beide Drähte gleich dick, so wird die Empfindlichkeit um 17% vermindert.

In der nebenstehenden Tabelle sind einige gute Konstruktionen ausgewählt, um einen Anhalt für die Empfindlichkeit dieser Instrumente zu geben.

Das Thermoelement von HASE hat einige Ähnlichkeit mit dem S. 432 beschriebenen AUSTINschen Element. MOLL stellt „Thermoblech“ in folgender Weise her: Zwei gleichdicke Streifen Manganin- und Konstantanblech werden längs einer Kante hart zusammengelötet und dann bis zur Dicke von 5 μ ausgewalzt, wobei die Walzrichtung der Lötnaht parallel ist. Aus der so gewonnenen Folie schneidet man schmale Streifchen mit der Schnittrichtung senk-

jedes Streifchen halb aus Konstantan- und halb aus Manganinfolie besteht.

MOLL, HASE und HILGER geben nicht den Ausschlag ihres Galvanometers an, sondern die Spannung: 90 bzw. 30 bzw 7,6 Mikrovolt Die eingeklammerten Ablenkungen gelten für ein Galvanometer von 10 Ohm und 10^{-9} Ampere/Skalenteil.

Fertig montierte Thermosäulen können von Carl Zeiss, Jena, von Leybold, Köln (nach MOLL) und von Adam Hilger, London bezogen werden.

3. Thermoelemente für Hochfrequenz.

a) Das Thermokreuz nach KLEMENÇIC, eines der besten und bequemsten Instrumente zur Messung schwacher Wechselströme. Es besteht aus zwei übers Kreuz gespannten Haardrähten, meist Konstantan (a) und Eisen oder Platin (b). Zwei Enden (a und b) sind mit dem Galvanometer verbunden, die beiden anderen mit der Stromquelle. An der Kreuzungsstelle sind die Drähte weich oder besser hart verlötet oder mittels eines Funkens verschweißt (S.353). Besser schlingt man die Drähte (vor der Lötung) so umeinander, daß sowohl (a) als auch (b) je einen rechten Winkel bildet. Häufig sind die Drähte in einem evakuierten Rohr von der Form einer kleinen Glühlampe montiert.

Meist schaltet man so, daß das Galvanometer z. B. an den vorderen Enden von (a) und (b) liegt, die Wechselstromquelle an den rückwärtigen. Oder man schickt den Wechselstrom durch den einen Homogendraht und legt das Galvanometer an das Ende dieses Heizdrahtes sowie an ein Ende des Kreuzdrahtes, dessen anderes Ende freibleibt. Wie DIESSELHORST[8]) zeigte, ergeben sich bei der Eichung des Elementes bei beiden Schaltungen Übelstände. Bei der zweiten Schaltung kommt man jedoch zu einwandfreien Resultaten, wenn man parallel zu dem Heizdraht einen Nebenschluß von vielmals höherem Widerstand legt und auf diesem den Punkt aufsucht, der bei sehr schwachem Strom gegen die Kreuzstelle des Thermoelementes keine Spannung besitzt. Wenn man dann das Galvanometer zwischen diesen Punkt und das eine Ende des Kreuzdrahtes legt, so zeigt es bei stärkeren Heizströmen die reine thermoelektrische Spannung. Ein Rest OHMschen Spannungsabfalles läßt sich durch Kommutieren des Heizstromes beseitigen.

b) AUSTINsches Element. L. A. AUSTIN[9]) verwendet die Kombination Tellur gegen Platin oder Konstantan. Man stellt diese vielbenutzten Thermoelemente nach seiner Vorschrift auf folgende Weise

[8]) H. DIESSELHORST, Verh. d. D. Phys. Ges. 4, 23. 1923.

[9]) L. W. AUSTIN, Bull. Bur. of Stand. 7. 301 1911; Phys ZS 12 1226.

her: Zwei steife Kupferdrähte a und b (Fig. 27) von etwa 2 mm Durchmesser werden in Durchbohrungen eines Zylinders aus Hartgummi oder einem ähnlichen Isolationsmaterial im gegenseitigen Abstand von etwa 4 mm befestigt. — Ein Platindraht von 0,6—1 mm Durchmesser wird am Ende in der Gebläseflamme weißglühend gemacht und mit einem kleinen Tellurkristall in Berührung gebracht. Sofort schmilzt das Tellur (Schmelzpunkt 452°) an dem Draht fest. Nun bringt man den Platindraht mit dem Ende vertikal nach abwärts einen Augenblick über die Spitze eines kleinen Flämmchens, bis das Tellur wieder schmilzt und einen Tropfen T bildet. Nachdem dieser erstarrt ist, schneidet man den Platindraht einige Millimeter unter dem Kügelchen ab und lötet ihn (mit Zinnlot) an das Ende des Drahtes a. An die Spitze von b, die in gleicher Höhe liegt wie das Tellur, wird ein Platin- oder Konstantan-Haardraht von etwa 0,02 mm Durchmesser gelötet und so gebogen, daß er auf kürzestem Wege das Tellur berührt. Endlich verschweißt man die Berührungsstelle mit einem Fünkchen, wie S. 353 beschrieben. AUSTIN sagt: „Der Kontakt wird weniger zerbrechlich sein, wenn die Schweißung in einer sauerstofffreien Atmosphäre vorgenommen wird."

Fig. 27. Thermoelement nach AUSTIN

4. Andere Methoden zur elektrischen Temperaturmessung.

a) Bolometer und Widerstandsthermometer. Die Methoden, mittels der Widerstandsänderung von Metallen Temperaturen zu messen, sind an anderer Stelle beschrieben. Trotz des verhältnismäßig kleinen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes von 3 bis höchstens 7 Promille pro Grad[10]) ist die Empfindlichkeit dieser Anordnungen, dank der außerordentlich großen Genauigkeit der WHEATSTONEschen Schaltung, mindestens ebenso groß wie die der Thermoelemente. Zur Temperaturmessung (nach 1. S. 423) verwendet man fast ausschließlich Platindraht, der auf ein Glimmer- oder Porzellankreuz aufgewickelt oder in Quarzglas eingeschmolzen ist (Platinthermometer), und dessen Widerstand zwischen — 40 und + 1000° streng durch eine quadratische Gleichung dargestellt werden kann. Für Strahlungsmessungen gelten hier ebenso wie bei Thermoelementen die auf S. 427 formulierten Punkte 2, 3, 4 und 5. Man benutzt daher feinste Drähte oder schmale Streifchen aus dünnen Folien. Vgl. z. B. die auf S. 410 zitierte Arbeit von LEIMBACH, der Bänder

10) Von W. GEISS und J. A. M. VAN LIEMPT an Nickel beobachtet, ZS. f.,

von 25 μ Breite und 0,28 μ Dicke für sein Bolometer herstellte. Als Material kommt neuerdings auch Wolfram in Frage, dessen Temperaturkoeffizient, wie erwähnt, um etwa 30% höher ist als der von Platin.

b) Halbleiter von hohem Temperaturkoeffizienten. WEURICH[11]) fand, daß der Widerstand von Bleichromat bei einer Temperatursteigerung von 0 auf 800° von $1{,}7 \cdot 10^9$ bis auf $5{,}4 \cdot 10^1$ sank. WILLIAMS[12]) erhielt durch Zusammenschmelzen von Kupfer und Glimmer im elektrischen Lichtbogen eine spröde Masse von hohem spezifischen Widerstand, die sich aber zwischen Platinfolien zu dünnen Häutchen pressen ließ und die (zwischen 25 und 30°) ihren Widerstand um 5% pro Grad änderte. Nach einigen, von Herrn VAN SUCHTHELEN im Laboratorium für technische Physik der Technischen Hochschule München ausgeführten Versuchen scheinen aber die Werte schlecht reproduzierbar zu sein.

Neuntes Kapitel.

Photographie.

Die allgemeine photographische Technik wird in mehreren empfehlenswerten Büchern gelehrt. Hier sei nur auf das „Kompendium der Photographie" von SCHMIDT[1]) hingewiesen, auch auf das treffliche kleine Rezeptbuch der Firma Hauff, „Die photographische Entwicklung".

Die photographische Technik des Wissenschaftlers wird jedoch von anderen Gesichtspunkten geleitet als die des Amateurs. Hier sind meist möglichst kontrastreiche Platten erwünscht; die „Rettung" einer stark überbelichteten Aufnahme spielt nur ganz selten eine Rolle, da dieselbe, wenn Licht im Überfluß vorhanden ist, leicht mit kleinerer Blende, kürzerer Expositionszeit oder unempfindlicherer Platte wiederholt werden kann, wohl aber die Ermöglichung einer Aufnahme mit sehr geringer Beleuchtung, bei der die gewöhnliche Technik versagen würde. Besonders aber das Sensibilisieren von Platten für rotes und ultrarotes Licht kommt wohl ausschließlich für physikalische Untersuchungen in Betracht.

1. Plattensorten.

a) Käufliche Platten. Unter den zahlreichen vorzüglichen Fabrikaten, die auf dem Markt sind, seien einige hervorgehoben, die sich bei physikalischen Untersuchungen bewährt haben:

---

[11]) C. N. WEURICH, Sill. Journ. 32, 269. 1911.

[12]) A. L. WILLIAMS, Phil. Mag. 40, 281. 1920.

[1]) F. SCHMIDT, „Kompendium der praktischen Photographie" 12. Aufl. Leipzig

Nur Blau-Violettempfindlich: Sehr unempfindlich, sehr feinkörnig, sehr hart arbeitend: Photomechanische Platten Kranz VIII von Krauseder-München.

Klar arbeitende Platten mittlerer Empfindlichkeit. „Eisenberger Reform" (vorzüglich für Ultraviolett-Spektroskopie). Empfindlicher: „Eisenberger Extrarapid".

Höchste Empfindlichkeit: „Herzog Ortho-Isodux"; „Hauff Ultrarapid".

Röntgenplatten. Schleußner „Neo"-Platten und „Doneo" doppelt gegossene Filme.

Schumannplatten für das äußerste Ultraviolett· A. Hilger in London.

Auch Gelb-Grünempfindlich: „Perutz, Perorto-Grünsiegel".

Auch Rotempfindlich: „Perutz, Panchromatische Rapidplatte", Ilford, „Special rapid panchromatic", erhältlich bei Romain Talbot, Berlin.

b) Herstellung von SCHUMANNplatten. Bekanntlich haben die Untersuchungen von V. SCHUMANN ergeben, daß die starke Absorption der die Bromsilberkörner einbettenden Gelatine bei Spektralaufnahmen ein Vordringen nach dem ferneren Ultraviolett vereitelt. Die äußerste Grenze, bis zu der gewöhnliche Platten noch brauchbar sind, liegt etwa bei der starken Aluminiumlinie 1852 Å. Aber schon von 2300 Å ab, also noch in Gebieten, die mit Quarzoptik bequem zugänglich sind, stört die Absorption sowie die Fluoreszenz der Emulsionsgelatine, bei 2000 Å erhöht sie die Expositionszeit bereits auf das 200fache.

Es gelang SCHUMANN, Platten herzustellen, deren Schicht nur Spuren von Gelatine enthält, indem er die wässerige Emulsion auf die Platte aufgoß, das Bromsilber sich absetzen ließ und dann die über dem Niederschlag stehende Flüssigkeit wieder abgoß, und diese Platten sind für die modernen Arbeiten mit kürzesten Wellenlängen (von 2000—130 Å) unentbehrlich geworden. Das von ihm ausführlich angegebene Rezept[2]) läßt sich ohne besondere Schwierigkeit ausführen. Er betont, daß das Gelingen sehr von der verwendeten Gelatine abhängig sei und empfiehlt, die weiche englische Gelatine „Nelson Nr. 1" zu verwenden. Verfasser korrespondierte diesbezüglich mit den „Deutschen Gelatinefabriken in Schweinfurt" (Dr. LÜPPO-CRAMER) und erhielt von dort eine deutsche Gelatine, die sich mehrfach sehr gut bewährte.

Rezept zur Herstellung von SCHUMANNplatten: Man bereitet vor: Die Glasplatten. Um viel Emulsion aufgießen zu können, ohne daß diese herunterläuft, sollen die Kanten der Plattenränder abgestumpft sein. Man verwendet z. B. alte, abgewaschene Negative und schleift

dem rotierenden Schleifstein eine wenige Zehntel Millimeter breite
ette an den Rändern an, die etwa unter 45° zur Plattenebene liegt.
Sehr bequem ist ein elektrisch heizbares Wasserbad in der Dunkel-
ımer. Ferner benötigt man: Eine nivellierbare Platte (A), die etwas
mäler sein muß als die Längsseite der Platten und so lang sein soll,
man möglichst alle zu gießenden Platten mit Zwischenräumen von
1 cm nebeneinanderlegen kann. — Einen Erlenmeyerkolben (B) für
ccm, mit gutem, neuen Kork. Eine flache, runde Porzellanschale
. Ein Stehkölbchen für etwa 50 ccm (C) Ein Becherglas (E) und
n Kolben (F) für je 600 ccm. Einen Glastrichter, in dessen Hals
a 1 cm hoch Glaswolle gestopft wird, so daß Wasser mit mäßiger
chwindigkeit durchfließt. Einen Hornspatel. Ein Stück Leinwand oder
l, ca. 20 × 20 cm groß. Einen Glasstab zum Rühren
lan reinigt alle Gefäße mit Lauge und Chromschwefelsäure, wie S. 370
egeben. Ferner wiegt man ab: 4,5 g Bromkalium, 2,25 g Gelatine,
3 g Silbernitrat. — Bromkali, Gelatine und 30 ccm destilliertes Wasser
ımen in den Kolben (B); Silbernitrat und 30 ccm destill. Wasser
len Kolben (C).
lach 20—30 Minuten werden Silbernitrat und Bromkali gelöst und
Gelatine wird gequollen sein. Nun bringt man die Gefäße (B) und (C)
las Wasserbad, dessen Temperatur auf 60° einreguliert wurde. Die
ıtine schmilzt. Wenn die Flüssigkeiten sich auf etwa 60° erwärmt
en, verdunkelt man und nimmt alle folgenden Operationen bei
m Licht vor, das jedoch recht hell sein darf.
lan stellt die Emulsion her, indem man (C) in kleinen Portionen in
stark geschüttelte (B) eingießt — nicht etwa (B) in (C) eingießen!
rauf verschließt man (B) mit dem Kork, umwickelt die Flasche mit
m Tuch (weil sie heiß ist) und schüttelt 1/2 Minute lang kräftig durch.
Emulsion, die wie Rahm aussieht, wird für 1/2 Stunde in das auf 60°
ıltene Wasserbad gestellt um zu reifen und damit sich größere Flocken
Bromsilber absetzen. Inzwischen bereitet man ein Stück Eis vor,
das man die Schale (D) setzen kann, ohne ein Kippen befürchten zu
ısen. Nach Ablauf der halben Stunde gießt man die Emulsion von
ı Niederschlag ab in (D), stellt die Schale auf das Eis und bedeckt
Nach wenigen Minuten ist die Emulsion erstarrt, sie soll aber 2 bis
tunden auf Eis bleiben, um möglichst hart zu gelatinieren. Dann
l sie mit dem Hornspatel in kleine Stückchen zerschnitten und als
ıfchen in die Mitte des Mulltuches gebracht, dieses an den vier Ecken
ßt, mit einem Bindfaden zugeschnürt und für 2—3 Stunden in einen
f mit langsam fließendem Wasser gebracht. (Verfasser pflegte die

Wenn die Emulsion genügend ausgewaschen ist, füllt man 475 ccm destilliertes Wasser in das Becherglas (E), bringt es zum Sieden und kühlt auf 55° ab. Das Säckchen mit der Emulsion wird aus dem Wasser genommen, sanft ausgedrückt und in das Glas (E) gehängt. Sofort schmilzt die Emulsion. Man zieht das Säckchen einige Male heraus und senkt es wieder ein, bis es leer ist. Dann rührt man mit dem Glasstab um (Entstehung von Luftblasen vermeiden!) und filtriert durch den Trichter mit Glaswolle in den Kolben (F). Die Emulsion ist damit fertig und soll „unverzüglich verwendet werden".

Inzwischen wurden die Glasplatten mit Salpeter- oder Chromschwefelsäure und destilliertem Wasser gereinigt, getrocknet, auf das Gestell (A) gebracht und dieses nivelliert. Zwischen je zwei Platten soll, wie oben erwähnt, ein Abstand von ca. 1 cm sein und die Platten sollen vorne und hinten einige Zentimeter über das Gestell hervorragen. — Man gießt vorsichtig Emulsion auf die erste Platte, bis sie 2—3 mm hoch steht, durch Kapillarkräfte am Herablaufen verhindert. Einer 9 × 12-Platte darf man 25 ccm zumuten. Da meist die nebenliegenden Platten von der herablaufenden Emulsion verdorben werden, nimmt man lieber nur 20 ccm und mißt dieses Quantum für jede Platte in einer kleinen Mensur ab. Eder empfiehlt, die Glasplatten vorher mit Wasserglas bis auf die Ränder zu bestreichen um das Herablaufen zu verhindern. Das Begießen läßt sich aber auch ohne dieses Hilfsmittel unschwer ausführen.

Sind alle Platten begossen, so stülpt man einen größeren Kasten darüber um sie vor Staub zu schützen. Wenn die Luft recht trocken ist, feuchtet man den Kasten innen kräftig an, um das Trocknen der Gelatine zu verhindern. So läßt man die Emulsion $^1/_2$—2 Stunden absitzen. Die Temperatur soll dabei nicht zu niedrig sein: Schumann schreibt mindestens 18°, Wolff[3]) mindestens 25° vor. Bei erfahrungsgemäß niedrigerer Temperatur der Dunkelkammer läßt sich leicht eine elektrische Heizvorrichtung improvisieren durch ein untergestelltes, mit Eisendraht bewickeltes Brett (Reißbrett).

Wenn sich der Niederschlag abgesetzt hat, wird die Flüssigkeit abgegossen. Dazu schiebt man eine (rechteckige) Schale unter den rückwärts vorstehenden Plattenrand und hebt mit dem Finger, von unten drückend, den vorderen Plattenrand hoch. Dann faßt man die Platte an zwei Kanten und stellt sie zum Trocknen auf Filtrierpapier mit der Schicht gegen die Wand. Wichtig ist, daß durch Luftzug oder leichtes Erwärmen der Platten sehr starke Trockenzonen entstehen. Endlich werden je zwei Platten zusammen in schwarzes Papier gewickelt, Schicht gegen Schicht, aber durch W-förmig gefalzte Kartonstreifchen vor

gegenseitiger Berührung geschützt. Diese Platten bekommen nach einer Woche ihre größte Empfindlichkeit und halten sich etwa 1 Jahr.

Von dem angegebenen Rezept kann in folgenden Punkten abgewichen werden:

1. Besonders feinkörnige Platten erhält man, wenn man die gröberen Teilchen aus einer wenige Millimeter hohen Schicht vor der Verwendung der Emulsion sich absetzen läßt. Man muß dazu die Emulsion zunächst einige Zeit in einer großen Porzellanschale stehen lassen, und das Absetzen der übrigbleibenden feinkörnigen Teilchen auf den Glasplatten dauert entsprechend länger. Das Verfahren ist in der zitierten Arbeit von SCHUMANN genau beschrieben.

2. Handelt es sich nur um das noch mit Quarzoptik zugängliche Gebiet von 2300—1850 Å, so empfiehlt sich, wie der Verfasser gefunden hat, die doppelte Konzentration der Gußemulsion: d. h. man löst die gelatinierte Emulsion nicht, wie oben angegeben, in 475, sondern nur in 240 ccm destilliertes Wasser. Diese Platten haben sich bei vielen Versuchen sehr gut bewährt. Die trockene Schicht derselben ist viel robuster als die der eigentlichen Schumannplatten, sie verträgt z. B. vorsichtiges Abwischen mit dem Finger; andererseits genügte bei der Wellenlänge 2000 Å $^1/_{200}$ der für gewöhnliche Platten nötigen Expositionszeit um gleiche Schwärzung zu erzielen.

Das Entwickeln und Fixieren von Schumannplatten geschieht wie bei gewöhnlichen Platten, nur muß man beim Schaukeln der Schalen vorsichtig sein, damit die zarte Schicht nicht fortgespült wird. Die Platten fixieren sehr schnell und sind nach wenigen Minuten genügend gewässert.

Schumannplatten sind käuflich bei ADAM HILGER, Ltd. 75a Camden Road, London NW.

Sensibilisieren von Platten für Ultraviolett s. S. 442.

Die wohl kaum benützte, ziemlich komplizierte Vorschrift von ABNEY zur Herstellung von Bromsilber, das bis 20 000 Å empfindlich ist, findet sich im Bd. 1 von KAYSERS Handbuch der Spektroskopie.

2. Sensibilisieren von Platten.

Bekanntlich hat man zahlreiche Farbstoffe gefunden, welche die etwa bei 4900 Å liegende langwellige Grenze der Lichtempfindlichkeit des Bromsilbers mehr oder weniger weit nach längeren Wellen verschieben. Eine inhaltreiche Monographie über dieses Thema hat A. HÜBL in seinem Buch „Die orthochromatische Photographie"[4]) gegeben. — Man kann

4) A. von Hübl, [illegible]

entweder den Farbstoff vor dem Gießen der Platten der Emulsion zusetzen, oder die Platten vor dem Gebrauch in der Farbstofflösung baden („Badeplatten"). Das erste Verfahren wird in Plattenfabriken angewandt, das zweite kommt vorzugsweise für die Arbeiten des Physikers in Betracht. Bei den Platten des Handels wird meist auf Rotempfindlichkeit verzichtet. Für derartige Fabrikate hat sich die Bezeichnung „orthochromatische Platten" eingebürgert; Platten, die außerdem auch rotempfindlich sind, nennt man „panchromatische Platten". Die Empfindlichkeit der ersteren reicht etwa bis 5000 Å, die der letzteren bis etwa 6800 Å. Beide haben ein charakteristisches Empfindlichkeitsminimum von 4890—5140 Å. Badeplatten haben im allgemeinen höhere Farbenempfindlichkeit und wesentlich geringere Haltbarkeit wie in der Emulsion gefärbte Platten. Zum Baden benutzte Platten sollen kein Jodsilber in der Schicht enthalten.

a) Verschiedene Sensibilisatoren. Farbstoffe zum Sensibilisieren werden von der I. G. Farbenindustrie Aktienges. Photogr. Abt. (Agfa Photo), Berlin SO 36, hergestellt. Über die Eigenschaften derselben orientiert das „Pinahandbuch" dieser Firma. Die Wirkung eines Sensibilisators wird erschöpfend charakterisiert durch eine Kurve, bei der als Abszissen die Wellenlängen, als Ordinaten die Schwärzungen aufgetragen sind. Derartige Kurven finden sich z. B. in einer Arbeit von EDER[5]), ferner von STENGER[6]) und von WALTERS und DAVIS[7]). Quantitative Aufschlüsse über die Wirkung der verschiedenen Sensibilisatoren geben diese Arbeiten allerdings nicht, da bei verschiedenen Wellenlängen λ nicht dieselbe Energiemenge $\varDelta E$ auf ein $\varDelta \lambda$ kommt, wohl aber gute qualitative Vergleiche verschiedener, mit derselben Anordnung untersuchter Sensibilisatoren.

Vom Standpunkt des praktischen Physikers, der sich für das Sensibilisieren nur interessiert, um auf möglichst einfache Weise möglichst empfindliche Platten für Spektralaufnahmen zu erhalten, ist zu sagen: Es gibt eine große Zahl von guten Gelb-Grün-Sensibilisatoren; keiner von ihnen ist von überragender Güte. Der beste Sensibilisator für Blaugrün ist das erst seit einigen Jahren hergestellte Pinaflavol, für Rot das seit langem geschätzte Pinacyanol. Derjenige Sensibilisator, dessen Wirkung sich am weitesten nach den langen Wellen erstreckt, ist das Dicyanin A, ein guter panchromatischer Sensibilisator das Pinachromviolett.

---

[5]) J. M. EDER, Sitzungsber. d. Wiener Akad. 124, 231. 1915.
[6]) E. STENGER, ZS f. Reprod.-Technik 8, 70. 1906.
[7]) F. M. WALTERS und R. DAVIS, Scient. Pap. of the Bureau of Stand. 17,

Diejenigen Sensibilisatoren, die der Verfasser für besonders wichtig hält, sind in Tafel I dargestellt[8]). Zu den Aufnahmen diente ein großer Dreiprismen-Spektrograph, auf dessen Spalt ein kleiner Graukeil befestigt wurde, so daß die oberen Teile des Spaltes nur $^1/_{500}$ der Lichtmenge erhielten, die auf seine Basis auffiel. Zur Beleuchtung wurde eine mattierte Halbwatt-Lampe verwendet. Auch bei diesen Aufnahmen trifft auf einen 1 mm breiten Streifen im Rot eine viel größere Energie, als auf einen ebenso breiten Streifen im Blau: Einmal, weil die Lampe etwa wie ein schwarzer Körper von 2000° strahlt, dessen Energiemaximum im Ultrarot liegt, zweitens, weil das prismatische Spektrum nach dem violetten Ende hin immer mehr auseinandergezogen wird und drittens, weil die Absorption des Flintglases, aus dem die Prismen bestehen (0[102]) schon im Blau merklich wird. Qualitativ geben die unter möglichst gleichen Bedingungen gemachten Aufnahmen jedoch einen guten Überblick. Es wurden die von K. W. MEISSNER empfohlenen „Eisenberger-Extrarapidplatten" benutzt. Die erste Aufnahme zeigt die Empfindlichkeitskurve der nicht vorbehandelten, schon in der Emulsion etwas sensibilisierten Platte, die folgenden sind mit Platten, die mit Pinaflavol, Pinachrom, Pinacyanol, Pinacyanolblau und Dicyanin A gebadet wurden, erhalten. Bei extrem langen Belichtungszeiten kann man bekanntlich mit Dicyaninplatten noch Spektrallinien von der Wellenlänge 1 μ (10 000 Å) photographieren[9]). Es wurde daher, um das Vorrücken der langwelligen Grenze zu zeigen, die letzte Aufnahme 15 mal so lange belichtet. Man sieht jedoch aus den beiden letzten Bildern, daß der Intensitätsabfall an der langwelligen Grenze äußerst steil ist.

b) Rezepte. Die Sensibilisatoren werden „in Substanz" (nicht in Lösung) in Packungen zu 0,1, 0,5 und 1 g geliefert. Man stellt zunächst eine 0,1 proz. „Stammlösung" her, indem man z. B. 50 mg des Farbstoffes in 50 ccm Alkohol löst. Die Haltbarkeit dieser Lösungen ist bei verschiedenen Sensibilisatoren sehr verschieden groß: Pinachrom hält sich fast unbegrenzt, Dicyanin A nur einige Monate. Für letzteres soll man möglichst absoluten Alkohol (vgl. S. 348) verwenden. Die Lösungen müssen gut vor Licht geschützt aufbewahrt werden.

Ammoniakzusatz. Durch Baden in einer 1—5 proz. Ammoniaklösung kann man die Empfindlichkeit der Trockenplatten — auch der nicht sensibilisierten — wesentlich, etwa auf das Doppelte, steigern;

---

[8]) Für seine Hilfe bei der Anfertigung der Aufnahmen bin ich Herrn A. MÜLLER zu besonderem Dank verpflichtet.

[9]) V. P. LUDOVICI und E. M. PEARSON erhielten bei 20stündiger Belichtungszeit noch das Quecksilberdublett 10 121/10 165 Å. (Proc. Roy. Soc. Canada 16.

die Platten bekommen dadurch jedoch starke Neigung zum Schleiern und halten sich nur wenige Tage. Die Frage, ob man zu dem Sensibilisierungsbad Ammoniak zusetzen soll, scheint noch nicht ganz geklärt; vielleicht hängt der Erfolg in manchen Fällen von dem verwendeten Plattenmaterial ab. Will man möglichst empfindliche Platten erzielen, so dürfte sich ein Zusatz von 1 bis 4 ccm Ammoniak pro 100 ccm Badeflüssigkeit empfehlen. Man gibt erst das Ammoniak, dann die alkoholische Stammlösung in das Bad.

v. Hübl rät von dem Ammoniakzusatz ab und empfiehlt statt dessen 1 ccm kalt gesättigte Boraxlösung pro 100 ccm Bad zuzusetzen. Ammoniakzusatz ist dagegen nötig, wenn der verwendete Alkohol sauer reagiert, was zuweilen vorkommt.

In der folgenden Tabelle sind die Zusammensetzungen einiger Sensibilisierungsbäder zusammengestellt

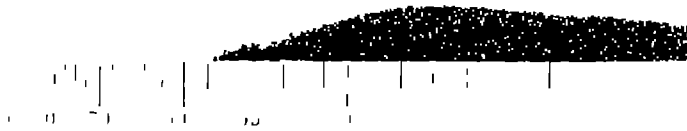
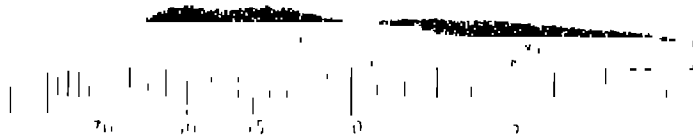
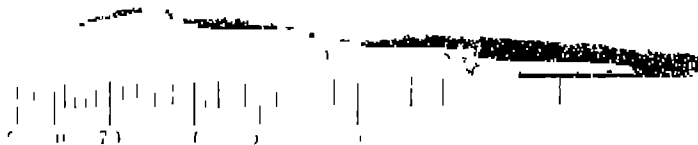
Sensibilisator	Alkohol	Wasser	Stammlsg.
Pinaflavol	20 ccm	80 ccm	3 ccm
Pinaverdol	20 „	80 „	3 „
Pinachrom	20 „	80 „	2 „
Pinachromblau	50 „	50 „	2 „
Pinachr. violett	20 „	80 „	2 „
Pinacyanol	30 „	70 „	1,5 „
Pinacyan. blau	50 „	50 „	1,5 „
Dicyanin	40 „	60 „	3 „

Für Pinacyanolblau und Dicyanin empfiehlt Valenta den (Äthyl-) Alkohol durch Methylalkohol zu ersetzen; auch Aceton soll sich bei Pinachrom und Dicyanin bewähren.

Die Haltbarkeit dieser Badeflüssigkeiten schwankt zwischen einigen Monaten (bei Pinachrom) und wenigen Minuten (bei Pinacyanolblau). Bei letzterem (und auch bei Dicyanin A) bereitet man daher alles vor und gießt erst im letzten Augenblick das in einer kleinen Mensur bereitgestellte Quantum der Stammlösung in die Badeflüssigkeit.

Die Platte muß in der Lösung unter häufigem Schaukeln 2—4 Minuten in vollständiger Dunkelheit gebadet werden Zur Zeitmessung ist sehr bequem eine sog. Telephonuhr (Preis 7 M.), die durch Druck auf einen Knopf aufgezogen wird und nach Ablauf von 3 Minuten ein Glockenzeichen gibt — besonders wenn man die Uhr mit Radium-Leuchtzeiger versehen läßt — Die Wirkung wird besser sein, wenn das Bad eine Mindesttemperatur von 20° hat, damit der Farbstoff besser eindringen kann.

Würde man die Platten nur in einer alkoholischen Farbstofflösung

Tafel I.

Ungebadete Platte
Pinaflavol
Pinachrom
Pinacyanol
Pinacyanolblau
Dicyanin A
Dicyanin A 15mal so lang belichtet.

lisiert. Andererseits wird aber auch die im wässerigen Bad entstandene ırbung des Bromsilberkorns durch Waschen in Alkohol nicht rückngig gemacht, dieser entfernt nur den freien Farbstoff aus der Gelatine. eil dadurch die Schicht viel weniger Licht absorbiert, ist es (nach HÜBL) sehr empfehlenswert, die Platten nach dem Sensibilisieren ter ständigem Schaukeln etwa eine Minute lang in 90 proz. Alkohol spülen.

Auf der Erfahrung, daß alkoholische Lösung nicht sensibilisiert, hat ÖNIG[10]) folgende Sensibilisierungsvorschrift aufgebaut: Man badet die atten in einer Mischung aus 100 ccm gewöhnlichem Alkohol und ccm Farbstofflösung 1:1000 Dies kann bei rotem Licht geschehen ıd es genügt, die Platten kurz einzutauchen. Sie werden dann geocknet und evtl. lange (18 Monate!) aufbewahrt. Um sie farbenipfindlich zu machen, legt man sie in vollständiger Dunkelheit 5 Miıten in ein Wasserbad. Dieses Verfahren, das klararbeitende, empfindhe Platten liefern soll, ist aber nur bei denjenigen Sensibilisatoren anendbar, die in Wasser spurenweise löslich sind, z. B. bei Pinachrom; eniger bei Pinacyanol, gar nicht bei Pinachromblau und Pinachromolett. Über Dicyanin A finden sich keine Angaben.

Eine eigenartige Methode von WEISSENBERGER, den Sensibilisatorrbstoff durch Essigsäure zu entfärben und dadurch während des ıdens unwirksam zu machen, ist in dem Buch von v. HÜBL (l. c. S. 437) schrieben. Beim Eintrocknen wird der ursprüngliche Farbstoff wieder ısgeschieden und die Platte wird empfindlich.

Die Trocknung der sensibilisierten Platten soll möglichst rasch vor ch gehen. Am besten verwendet man einen mit Wasser von 35° gefüllten asten, auf dessen schräge Vorderwand man die Platte legt und einen einen Ventilator, der mäßigen Wind erzeugt[11]). Die Trocknung ist dann wenigen Minuten beendet.

Panchromatische Platten. Die Mischung zweier Farbstoffe ist in r Regel weniger wirksam. Sehr einfach kann man Platten, die für s ganze sichtbare Spektrum empfindlich sind, durch Baden von (gelbunempfindlichen) „Perutz-Perorto-Grünsiegelplatten" in Pinacyanolsung herstellen. Noch besser dürfte die Kombination von Pinaflavol it Pinacyanol oder Dicyanin sein; doch muß man hierfür zwei getrennte ıder anwenden (erst Pinaflavol, dann Dicyanin). Ein empfehlensrter panchromatischer Sensibilisator ist, wie erwähnt, Pinachromviolett.

---

10) E. KÖNIG, Photogr. Rundschau, S. 257. 1917.

11) Vgl. K. W. MEISSNER, Ann. Phys. 50, 714. 1916, sowie L. GEIGER, ebd.

c) Sensibilisierung für Ultraviolett. Ähnlich, wie man durch Farbstoffzusatz die Platte für das primär unwirksame Rot empfindlich machen kann, erzielt man durch Bestreichen mit einer im äußersten Ultraviolett blau fluoreszierenden Substanz Schwärzung in diesem sonst nur mit Schumannplatten zugänglichen Gebiet. Die Analogie ist natürlich nur äußerlich.

Diese Art von Sensibilisierung wird in verschiedenen Arbeiten erwähnt. Duclaux und Jantet[12]) empfehlen eine Lösung von Aeskulin in Glyzerin oder blau fluoreszierendes Maschinenöl Sehr gut ist eine Mischung von Benzol mit einer Spur Paraffinöl.

Eine zweite Methode derselben Autoren ist, die Platte, um ihre Gelatine zu zerstören 4 Stunden bei 25° in verdünnter Schwefelsäure (1 : 10) zu baden („Schumannisierte Platten"). Vor dem Entwickeln soll man Kollodium aufgießen, damit sich die Schicht nicht ablöst. Derartige Platten sollen zehnmal so empfindlich sein wie Schumannplatten; der Erfolg hängt aber anscheinend sehr vom Plattenfabrikat (Jodsilbergehalt?) ab

d) Lichthofe und lichthoffreie Platten Ein Teil des Lichtes, welches die Schicht passiert hat, wird an der Grenze zwischen Gelatine und Glas, ein größerer zwischen Glas und Luft reflektiert, durchdringt die Schicht ein zweitesmal an anderer Stelle und gibt so Veranlassung zu den sog. „Lichthöfen". Für ultraviolettes Licht ist das Glas der Platte undurchlässig, und deshalb fehlen die Lichthöfe im Ultraviolett. Die Störung läßt sich dadurch vermeiden, daß man eine absorbierende Schicht (von nahe dem gleichen Brechungsvermögen wie Glas oder Gelatine) auf die Rückseite der Platte oder besser zwischen Emulsionsschicht und Glasplatte bringt. In dieser Weise sind die „lichthoffreien Platten" des Handels präpariert („Antihalo", „Isolar"). Bei der „Perorto-Braunsiegel"-Platte von Perutz z. B. befindet sich unter der Emulsion eine Absorptionsschicht von Mangandioxyd (Braunstein), das beim Fixieren der Platte von dem Natriumthiosulfat glatt gelöst wird

Eine gewöhnliche Platte kann man auf folgende Weise lichthoffrei machen. Man bestreicht die Glasseite mit einem gefärbten Lack. Verschiedene Präparate sind in Photohandlungen zu haben, z. B. „Aurinkollodium", „Solarin". Auch Asphaltlack ist empfehlenswert. Oder man preßt ein mit gefärbter, klebriger Gelatinemasse begossenes Blatt auf die Glasseite. Als sehr geeignet zu diesem Zweck hat sich die auf S. 358 angegebene „Rollermasse" erwiesen, die mit etwas „wasserlöslichem Nigrosin" (Kahlbaum) stark gefärbt wurde.

Im allgemeinen wird man jedoch mit den käuflichen lichthoffreien Platten auskommen. Bei Aufnahmen von Emissionsspektren stören Lichthöfe nur wenig, wohl aber können sie feine Absorptionslinien unterdrücken. Bei einer derartigen Untersuchung, bei der Dicyanin-Badeplatten verwendet werden mußten, hat das angegebene Verfahren mit Rollermasse große Verbesserung gebracht.

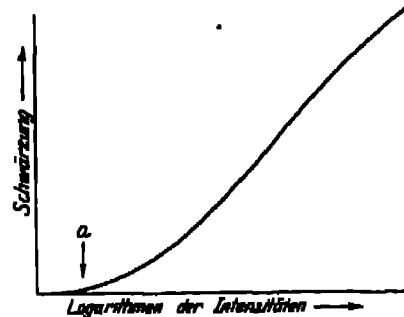
3. Die Aufnahme.

a) Änderung der Expositionszeit. Die photographische Platte ist gegen Änderungen der Expositionszeit lange nicht so empfindlich, wie der Anfänger glaubt. Z. B. lassen sich zwei Platten, von denen die eine die Hälfte, die andere das Doppelte der günstigsten Expositionszeit belichtet wurde, deren Expositionszeiten sich also wie 1 : 4 verhalten, unschwer so entwickeln, daß man keinen Unterschied merkt. Es ist daher ganz zwecklos, wenn etwa eine Belichtungszeit von 3 Stunden nicht genügt, eine zweite Aufnahme 4 Stunden zu belichten. Wenn bei einer Aufnahme nach genügend langer Entwicklung gerade nur die stärksten Linien erschienen sind, so belichte man beim zweiten Versuch (wenn das möglich ist) die 10fache Zeit. Hat man genügende Lichtstärke zur Verfügung und sucht (z. B. bei Spektralaufnahmen) die günstigste Belichtungszeit, so ändere man die Expositionszeiten im Verhältnis 1 : 4 : 16 : 64 : 256.

Fig. 28. Schwärzungskurve.

Bekanntlich erhält man nicht die gleiche Schwärzung, wenn man mit der Intensität J = 100 die Zeit t = 1 Sekunde belichtet oder mit J = 1 t = 100. Die Strahlung wirkt viel intensiver, je stärker sie ist (SCHWARZSCHILDsches Gesetz). Um zu zeigen, welche Verlängerungen der Exposition sich daraus ergeben ist die folgende Tabelle für einen SCHWARZSCHILDschen Exponenten $\vartheta = 0{,}9$, wie er für Platten die Regel ist, berechnet:

Intensität ×	Zeit	Intensität ×	Zeit	
300	1 Sek.	1 statt	6	9 Minuten
3600	1 „	1 „	1	2 Stunden
36 000	1 „	1 „	10	25 Stunden.

b) Die „Vorbelichtung“. Die Beziehung zwischen der auf eine Platte fallenden Lichtintensität J und der durch sie hervorgerufenen Schwärzung S wird bekanntlich durch eine S-Kurve dargestellt, deren

Kurve zeigt, daß die Platte eine gewisse kleine Schwellenenergie benötigt, die durch den Punkt a gekennzeichnet ist, bis sie sich zu schwärzen beginnt. Bei sehr geringen Lichtintensitäten kann es viele Stunden dauern bis der Punkt a erreicht ist, und es kann zur Durchführung des Experimentes sehr wichtig sein, die Expositionszeit abzukürzen. In solchen Fällen empfiehlt es sich, der Platte die Schwellenenergie auf einfacherem und schnellerem Wege zuzuführen, indem man sie einer schwachen Beleuchtung durch ein Glühlämpchen oder eine kleine Gasflamme aussetzt. Die richtige Lichtmenge wird dabei durch einen Vorversuch ermittelt. Nach WOOD[13]) hält man eine zunächst vollständig mit schwarzem Papier bedeckte Platte mit der Schicht gegen die etwa 2 m entfernte, sehr schwache Lichtquelle und zieht dann das Papier (nach dem Takt eines Metronomes) alle 2 Sekunden um etwa 1 cm zurück. Hierauf entwickelt man sie möglichst kräftig und zählt die erschienenen Streifen. Wenn der z. B. letzte eben noch sichtbare Streifen eine Expositionszeit von 4 Sekunden erforderte, so wird die zweite, für den eigentlichen Versuch bestimmte Platte im ganzen 4 Sekunden belichtet. Die Expositionszeit läßt sich durch die Vorbelichtung auf die Hälfte verringern. Ob man die Zusatzbelichtung vor oder nach dem Versuch macht, ist nach WOOD gleichgültig; doch scheint diese Frage sowie die weitere, ob die Farbe des Lichtes von Einfluß ist, noch nicht ganz klargestellt.

Bei Röntgenstrahlen beginnt die Schwärzungskurve im Nullpunkt, ein Schwellenwert besteht nicht[14]) und daher hat hier eine Vorbelichtung keinen Zweck.

4. Das Negativverfahren.

a) Entwickler. Alle modernen Entwickler geben bei sachgemäßer Anwendung gute Resultate. Andererseits übertrifft keiner die übrigen um ein Bedeutendes, derart, daß er z. B. aus einer stark unterbelichteten Platte mehr als alle übrigen „herausholen" würde.

Im folgenden seien drei besonders empfehlenswerte Entwicklervorschriften angeführt. Vorausgeschickt sei, daß die verwendete „Pottasche", Kaliumkarbonat, chemisch rein sein soll, da das technische Produkt Verunreinigungen enthält, welche die Entwicklung stark verzögern. Ferner scheint es nicht ganz überflüssig, auf den Unterschied zwischen dem hier (als Konservierungsmittel) gebrauchten Natriumsulfit (Na_2SO_3) und dem Natriumsulfat (Na_2SO_4) hinzuweisen

Besonders stark geschwärzte Negative liefert Methol-Adurolentwickler. Eine gute Vorschrift ist.

---

[13]) R. W. WOOD, Phys. ZS. 9, 355. 1908

Lösung A.	1000 ccm	dest. Wasser	Das Natriumsulfit erst zusetzen, wenn Methol und Adurol gelöst sind.
	5 g	Methol	
	10 g	Adurol	
	100 g	Natriumsulfit	
Lösung B.	1000 ccm	dest. Wasser	
	100 g	Pottasche, chem. rein.	

Zum Gebrauch mischt man 1 Teil A, 1 Teil B, 0—2 Teile Wasser. Die gebrauchte Lösung kann verwendet werden, bis sie sich gebräunt hat. Methol-Hydrochinon ist ebensogut, entwickelt aber unter 10° sehr langsam.

Besonders klare Negative erhält man mit Glyzinentwickler:

Lösung A.	1000 ccm	warmes dest. Wasser	In der angegebenen Reihenfolge zu lösen.
	100 g	Natriumsulfit krist.	
	10 g	Pottasche, chem. rein	
	20 g	Glycin	
Lösung B.	1000 ccm	dest. Wasser	
	100 g	Pottasche, chem. rein.	

Zum Gebrauch nimmt man 1 Teil A und 1 Teil B. Kleinste Spuren von Fixiernatron verursachen gelbe Flecken! Entwicklungstemperatur nicht unter 10°. Die Entwicklung beginnt erst ziemlich spät (nach 1/2 Minute) und ist in etwa 5 Minuten beendet. Tropfenweiser Zusatz von Bromkalilösung hält sie stark zurück.

Drittens sei auf das beliebte Rodinal hingewiesen, das als Lösung in jeder Photohandlung käuflich ist und zum Gebrauch mit 10—20 Teilen Wasser verdünnt wird. Die Schwärzung ist ungefähr so groß wie bei Glyzin, die Entwicklung verläuft etwas rascher als bei diesem, die Temperaturabhängigkeit ist gering.

b) Die Entwicklung. Normal und unterbelichtete Platten stellen keine besonderen Anforderungen an die Erfahrung des Operateurs: Erstere entwickelt man bis die Schwärzung in der Durchsicht etwas zu groß zu sein scheint, letztere — falls übertriebene Kontraste nicht schaden — bis die Platte an unbelichteten Stellen zu schleiern beginnt. Die Entwicklung dauert in letzterem Fall wesentlich länger.

Bei der überbelichteten Platte erscheint das Bild schnell, grau, schleirig, mit auffallend geringen Kontrasten. Würde man eine solche Platte ebenso entwickeln, wie eine normalbelichtete, so erhielte man ein unbrauchbar flaues Negativ. In diesem Fall ersetzt man den Entwickler möglichst schnell durch einen viel konzentrierteren, bromkalihaltigen und entwickelt ohne Rücksicht darauf, daß die Platte vor der Dunkelkammerlampe tief schwarz erscheint, bis die stärksten Lichter auf der

Platte dauert länger als die der normalbelichteten. — Das sehr dunkle aber einigermaßen kontrastreiche Negativ läßt sich später durch Abschwächen (S. 450) klären

Sehr angenehm ist der Gebrauch der sog. Desensibilisatoren. Verschiedene organische Farbstoffe setzen die Empfindlichkeit des Bromsilbers so stark herab, daß hochempfindliche, 2 Minuten in der stark verdünnten Lösung gebadete Platten bei gelbem Licht entwickelt werden können. Besonders empfehlenswert ist das „Pinakryptolgrün" „Agfa Photo", Berlin Man löst 0,2 g des dunkelgrünen Farbstoffes in 100 ccm destilliertem Wasser und setzt auf 100 ccm Entwicklerflüssigkeit 1—3 ccm dieser Lösung zu. Die Platte wird die erste Minute wie gewöhnlich behandelt und kann dann zum mindesten unbedenklich bei hellrotem Licht betrachtet werden Ebensogut wirkt Phenosafranin, das aber wegen seiner viel stärkeren Färbung weniger angenehm ist.

Will man das hellere Licht schon zu Beginn der Entwicklung verwenden, so badet man die Platte vor derselben 2 Minuten lang in einer Pinakryptollösung 1 · 5000 (bzw. Phenosafraninlösung 1: 10 000) und bringt sie dann in den Entwickler

Nach Stenger und Stammreich[15]) hat „Nilblau 2 B" eine noch tausendfach stärkere Wirkung. Die meisten Sensibilisatoren setzen nur die Blau-Violett-Empfindlichkeit herab, nicht die Rotempfindlichkeit einer sensibilisierten Platte. In dieser Hinsicht ist Pinakryptolgelb am günstigsten, das sich aber mit dem Natriumsulfit des Entwicklers nicht verträgt und deshalb nur als Vorbad anzuwenden ist. Für die normale photographische Praxis kann Verfasser das Pinakryptolgrün, das jetzt in Form von Tabletten im Handel ist, sehr empfehlen.

Bei der Desensibilisierung wird nur die Oberfläche der Bromsilberkörner unempfindlich gemacht. Es hat sich herausgestellt, daß die Platten nicht gegen Belichtung mit Röntgenstrahlen desensibilisiert werden. Man färbt daher vielfach Röntgenplatten mit einem Desensibilisator. Derart vorbehandelte Platten sind zwar für Röntgenstrahlen hochempfindlich, können aber trotzdem bei verhältnismäßig hellem Licht, fast wie das sog „Gaslichtpapier" (Chlorbromsilberpapier) entwickelt werden.

c) Das Fixieren. Wenn die Platte hinreichend entwickelt ist, wird sie mindestens 10 Sekunden lang gründlich unter dem Wasserstrahl abgewaschen und dann in das Fixierbad gebracht, in dem sich das nicht reduzierte Bromsilber löst.

Das Fixierbad, eine 10—15 proz. Lösung von Natriumthiosulfat, unterschwefligsaurem Natrium, soll angesäuert sein, weil es sich

[15]) E. Stenger und H. Stammreich, ZS. f. wiss. Phot. 22, 11. 1924;

onst bald bräunt. Rezepte zum ansäuern des Thiosulfates bei SCHMIDT
Es ist aber unbedingt zu raten, fertiges „saures Fixiersalz" (in Blechbüchsen) zu kaufen. Die Lösung gibt etwas gasförmige schweflige Säure ab, die in der Nähe stehende Instrumente beschädigen kann. Um die Gasabgabe einzuschränken, soll man das Fixierbad nicht in flachen Schalen stehen lassen, sondern die sehr praktischen Nutenträge benutzen, in die eine größere Anzahl Platten vertikal eingeschoben werden kann. Verschließt man den Trog mit einem Deckel aus paraffiniertem Holz, so kann man das Fixierbad sehr lange darin aufbewahren. — Das von den „Agfa"-Werken in Handel gebrachte „Schnellfixiersalz" ist Ammoniumthiosulfat. Es fixiert etwa doppelt so schnell wie das Natriumsalz.

Die Platten sollen nicht kürzer als 10 Minuten und nicht länger als Stunde im Fixierbad bleiben; mindestens doppelt so lange als sie brauchen, um klar zu werden, da sich zuerst ein schwer lösliches Doppelsalz bildet, das sich im Laufe der Zeit zu Schwefelsilber umsetzen würde. Nach neuen Untersuchungen von LUMIÈRE gilt dies allerdings nur für silberhaltige Fixierbäder.) In 1 Liter angesäuerter Fixiernatronlösung soll man höchstens 70 Platten 9 × 12 fixieren.

Es sei nachdrücklich betont, daß das Fixiernatron als das gefährlichste Gift für fertige Negative betrachtet werden muß. Die geringsten Spuren in der Schicht bewirken, daß das Negativ im Laufe der Zeit gelb wird und verblaßt. (Methoden zum Nachweis von Fixiernatron im Waschwasser siehe bei SCHMIDT.)

Rückgewinnung des gelösten Silbers. In 1 Liter Fixierbad, das durch lange Verwendung unbrauchbar geworden ist, sind 3—4 g Silber enthalten. Von den verschiedenen Verfahren, das Silber wiederzugewinnen, ist wohl das beste das von STEIGMANN[16]) angegebene. Man erwärmt das Bad auf 50—60°. (Höhere Temperatur ist nicht schädlich.) Dann setzt man pro Liter 8 g Natriumhydrosulfit und 8 g Soda zu. Es entsteht sofort ein dicker schwarzer Niederschlag, eine nahezu quantitative Fällung von reinem Silber. Das Fixierbad wird dadurch einigermaßen regeneriert.

d) Das Wässern und Trocknen. Da die Schicht die letzten Spuren von Fixiernatron nur sehr langsam abgibt, muß das Waschen der Platten lange fortgesetzt werden, mindestens $^1/_2$ Stunde in rasch fließendem Wasser, besser 1—2 Stunden. Der Wasserstrahl darf nicht aus einiger Höhe auf die Schicht fallen, da er sie sonst mechanisch zerstören würde. Nach dem Wässern wird die Platte unter den Wasserstrahl gehalten und die Schichtseite mit einem Wattebausch oder einfacher mit dem Handballen gründlich abgerieben, um sie von sedimen-

tierten Teilchen zu säubern, die sich nach dem Trocknen nur schw
entfernen lassen würden. Auch die Glasseite wird ebenso, nur n
stärkerem Druck, geputzt. Wertvolle Platten (z. B. solche, die phot
metriert werden sollen) spült man zuletzt noch mit destilliertem Wasser a

Das Trocknen des fertigen Negatives birgt unter Umständen no
Gefahren, die einer wertvollen Aufnahme verderblich werden könn
Da die Schicht schon bei 35—40° schmilzt, darf man die Platten nie
einen Ort stellen, wo sie von der wandernden Sonne erreicht oder v
einer unvermutet in Gang gesetzten Dampfheizung beschädigt werd
können! Ferner: Wenn die Platten bei schwülem Wetter nur sehr langs
trocknen, siedeln sich nicht selten Pilze auf der Schicht an, deren Wac
tum kleine, klare, runde Flecken mit dunklerem Rand erzeugt. Endl
darf man nie die Trocknung einer zur Hälfte noch feuchten Platte du
irgendwelche Eingriffe erheblich beschleunigen, da sonst das letzte St
dunkler wird als das langsam getrocknete („Trockenzonen").

Sehr empfehlenswert ist, die Platten vor einem langsam laufen
Ventilator zu trocknen. Die Verdunstungskälte ist dabei so groß, d
man unter Umständen die Platten sogar auf die Platte einer Dam
heizung legen darf, ohne daß sich die Schicht bis zum Schmelzen
wärmt; nur muß man zeitweise die Temperatur der Platte durch
fühlen der Glasseite prüfen. Auch die sog. „Föhn"apparate sind s
geeignet zum Plattentrocknen. Mit derartigen Hilfsmitteln kann
Trocknen auf wenige Minuten reduziert werden.

Zweitens kann man der Schicht durch Alkohol-(Spiritus-)bäder
Wasser entziehen. Jedoch entstehen dadurch manchmal Flecken
Streifen, nicht selten auch eine milchige Trübung, die allerdings wi
verschwindet, wenn man die Platte erneut in Wasser badet. Das Trock
mit Alkohol ist demnach für wertvolle Platten nicht zu empfehlen.
günstigere Resultate soll man dagegen mit Methylalkohol erzielen.

Eine dritte Methode, die Gefahren der Trocknung zu umgehen
die Härtung der Schicht mit Formalin. Wenn man das Negativ 5 Min
in einer 2 proz. Formalinlösung badet, hält die Schicht 40—50°
außerdem desinfiziert das Formalin sehr kräftig. Nach dem Ba
wird einige Minuten unter einem starken Wasserstrahl gewaschen, d
können die Platten sogar unter ständiger Bewegung über einem Bun
brenner getrocknet werden. — Stärkere Formalinlösungen sind zu
meiden, da sich die allzusehr gehärtete Schicht von der Glasoberfl
loslösen könnte. — Da Formalin das Fixiernatron zersetzt, darf es
nach dem Auswaschen angewandt werden.

e) Lackieren. Wertvolle Negative werden nach der Fertigstel

Bezeichnung: „Negativ-Kaltlack“) käuflich Man gießt auf die horizontal gehaltene Platte eine Portion des flüssigen Lackes auf, verteilt ihn durch vorsichtiges Neigen derselben und läßt den Überschuß von einer Ecke der Platte in die Vorratflasche zurücklaufen — Die Lackschicht kann mit Spiritus wieder abgewaschen werden.

f) Das Verstärken. Die Frage, ob ein gegebenes, dünnes Negativ verstärkt werden soll, ist für den Kunstphotographen viel schwerer zu entscheiden als für den Physiker, weil jener nur ungern die dabei eintretende Steigerung der Kontraste in Kauf nimmt, dieser dagegen kann jede Platte verstärken, wenn ihm die Schwärzung zu gering scheint. Nur bei Platten, die photometriert werden sollen ist von der Verstärkung abzuraten, weil eine bis auf wenige Prozent gleichmäßige Wirkung über die ganze Platte nicht verbürgt werden kann. Die Änderung der Schwärzungskurve durch die Verstärkung hat EDER[17]) untersucht.

Die Platten, die verstärkt werden sollen, müssen besonders sorgfältig fixiert und gewaschen sein. Ist dies zweifelhaft, so lege man das Negativ nochmals für 10 Minuten in eine frische Fixiersalzlösung und wasche 1 Stunde im fließenden Wasser. Man wird dann wohl 99% Treffer — allerdings aber 1% Versager haben.

Zwei Methoden haben sich besonders bewährt: Die Verstärkung mit Quecksilbersublimat und die mit Uran.

Quecksilberverstärker. Man bereitet folgende haltbare (sehr giftige!) Lösung, die lange verwendet werden kann:

100 ccm dest. Wasser
2 g Kochsalz
5 g Quecksilberchlorid
1 ccm chem. reine Salzsäure.

Das nasse oder trockene Negativ wird (bei Tageslicht) in eine Schale gelegt, in der sich genügend Lösung befindet. Durch das Sublimat wird weißes Silberchlorür und Quecksilberchlorür gebildet. Wenn die Platte auch auf der Rückseite weiß geworden ist, nimmt man sie heraus, gießt die Lösung zum Vorrat zurück und wässert $^1/_2$ Stunde in fließendem Wasser. Dann wird die Platte in einem Bad von verdünntem Ammoniak (halb Wasser, halb Ammoniak) geschwärzt, zuletzt wieder $^1/_2$ Stunde gewaschen.

Wenn die Sublimatlösung verbraucht ist, läßt sich das Negativ im Ammoniakbad nicht mehr schwärzen. Man badet es dann $^1/_2$ Minute in Fixiernatronlösung 1 : 10 und verstärkt es nach dem Wässern mit neuer Lösung. Ammoniakdämpfe sind beim Verstärken zu vermeiden, da sie die Sublimatlösung reduzieren.

Durch Baden in Fixiernatronlösung kann die Verstärkung rückgängig gemacht werden.

Uranverstärker. Man mischt in der angegebenen Reihenfolge:

50 ccm 1 proz. Urannitratlösung
10—12 ccm Essigsäure (80 %)
50 ccm 1 proz. Ferricyankaliumlösung.

Diese Vorratlösung ist im Dunkeln haltbar und kann wiederholt benutzt werden. Das Silber der Schicht nimmt in derselben eine braune Färbung an, welche besonders die photographisch wirksamen Strahlen stark absorbiert. Da der braune Farbstoff im Wasser spurenweise löslich ist, wässert man nur so lange, bis die Gelatine nicht mehr grünlich gefärbt ist (15 Minuten), und vermeidet, das Wasser längere Zeit auf ein und dieselbe Stelle der Schicht strömen zu lassen. Noch besser bringt man die Platte direkt aus der Verstärkerlösung in eine 3—4 mal zu wechselnde Mischung von 100 ccm gesättigter Alaunlösung, 1/2 ccm Salzsäure und 2—3 Tropfen 1 proz. Kaliumpermanganatlösung. Dann wird 10 Minuten gewaschen.

Die Uranverstärkung wird durch Baden in stark verdünntem Ammoniak fast momentan rückgängig gemacht, will man die Platte jedoch ein zweites Mal verstärken, so muß man sie vorher einige Zeit in einem Entwickler (bei Tageslicht) baden. Eine mit Sublimat verstärkte und mit Fixiernatron entkräftete Platte läßt sich mit Uran verstärken.

g) Das Abschwächen. In der Praxis des Physikers wird dieses Verfahren hauptsächlich angewandt, um allzu dichte Negative transparenter zu machen oder um den allgemeinen Schleier zu entfernen. Die Änderung der Schwärzungskurve durch das Abschwächen ist gleichfalls in der (l. c. S. 449) erwähnten Abhandlung von Eder besprochen.

Der Farmersche Abschwächer besteht aus folgenden zwei haltbaren Vorratlösungen:

A. 1000 ccm dest. Wasser
100 g Natriumthiosulfat (neutrales Salz).

B. 100 ccm dest. Wasser
20 g Rotes Blutlaugensalz (Ferricyankalium).

Kurz vor dem Gebrauch mischt man 100 ccm A mit 2—5 ccm B und legt die entweder schon getrocknete oder auch frisch aus dem Fixierbad kommende Platte in die grünliche Flüssigkeit. Dabei hält man die ständig geschaukelte Glasschale über ein gut beleuchtetes weißes Papier und beobachtet aufmerksam die Zunahme der Transparenz. Sobald diese genügt, wird die Platte mehrere Minuten lang kräftig abgespült,

Fixiernatron zu entfernen. Falls sich die Flüssigkeit entfärbt hat ehe die Aufhellung genügt, wird sie weggegossen und durch neue ersetzt.

Durch den Abschwächer wird das Silber (auf dem Umweg über Cyansilber) gelöst, bis zuletzt eine glasklare Platte resultiert Verschwundene Details in der Zeichnung sind daher unwiederbringlich verloren. Die Lösung erfolgt jedoch so langsam, daß man den Vorgang bei einiger Aufmerksamkeit gut beherrschen kann.

Während die Kontraste durch den FARMERschen Abschwächer etwas vermehrt werden, greift eine 5 proz. Ammoniumpersulfatlösung die stark geschwärzten Stellen am meisten an und verringert so die Kontraste.

Dichroitischer Schleier. Durch zu langes Entwickeln oder durch Verunreinigung des Entwicklers mit Fixiernatron entsteht manchmal ein durch kolloidales Silber bedingter Schleier, der in der Aufsicht grün, in der Durchsicht rot aussieht. Dieser läßt sich leicht durch Baden in einer sauren Lösung von Tiokarbamid (Hersteller: Chem. Fabrik J. Hauff, Feuerbach bei Stuttgart, erhältlich in den meisten Photohandlungen) entfernen. Die haltbare Lösung besteht aus:

100	ccm	dest. Wasser
2	g	Thiokarbamid (Sulfoharnstoff)
2	g	Alaun
1	ccm	Essigsäure.

h) Möglichst starke Kontraste. Gegeben sei eine Aufnahme mit nur zwei Schwärzungsgraden, einem helleren und einem dunkleren; z. B. ein zartes Schattenbild, oder eine wenig, aber gleichmäßig geschwärzte Kurve; nicht etwa ein Spektrum mit starken und schwachen Linien. Verlangt sei dieselbe Aufnahme, möglichst schwarz-weiß. Dazu wird die Platte mit Uran verstärkt, ein Diapositiv davon gemacht (auf Diapositivplatte, möglichst hart entwickelt), dieses wieder mit Uran verstärkt, auf dieselbe Weise ein neues Negativ hergestellt und auch dieses mit Uran verstärkt. Die Kontraste sind durch dieses Umdrucken ganz außerordentlich vergrößert worden

5. Pigmentdiapositive.

Die Behandlung des Positivverfahrens dürfte den Rahmen dieser Abhandlung überschreiten. Nur eine Frage aus diesem Gebiet möge gestreift werden: Welches Kopierverfahren gibt die Licht- und Schattenverteilung des Negatives am getreuesten wieder? Dies ist zweifellos der Pigmentdruck, speziell das Pigmentdiapositiv. Zur Erlernung dieses ausgezeichneten Kopierverfahrens, dessen Schwierigkeiten vielfach überschätzt werden, eignet sich besonders das vorzügliche Büchlein --- [illegible]

In zweiter Linie kommt glänzendes Zelloidinpapier in Frage, das mit Gold-Tonfixierbad behandelt wird, erst in dritter Linie die üblichen Gaslichtpapiere.

6. Abziehen von Plattenschichten.

Zur Gewinnung der Glasplatten von alten Negativen kann man sich des unter der Bezeichnung „Mattsalz" bekannten sauren Ammoniumfluorids bedienen Man stellt eine 1- bis höchstens 2 proz. Lösung des Salzes in kaltem destilliertem Wasser her. Bringt man die Platte in diese Lösung, so kann man nach wenigen Sekunden die Schicht als zusammenhängende Haut abziehen. Die Glasplatte wird dann sofort kräftig abgespült, damit nicht ihre Oberfläche durch die Fluorionen angegriffen und mattiert werde. In 200 ccm Lösung kann man mindestens 150 Platten 9 × 12 abziehen. Ähnlich wirkt 1—2 proz. Flußsäure.

7. Zeichnungen nach Photographien.

In dem auf S. 335 erwähnten „Handfertigkeitspraktikum" beschreibt Wehnelt folgenden Kunstgriff, um perspektivische Zeichnungen (z. B von einer Versuchsanordnung) anzufertigen. Man photographiert den Gegenstand auf mattglattes Bromsilberpapier (Negativ oder Positiv) Nach dem Trocknen des Bildes zieht man die Linien, deren Wiedergabe man wünscht, mit „unverwaschbarer" Ausziehtusche nach. Entfernt man dann alles Silber mittels des S. 450 beschriebenen Farmerschen Abschwächers, so bleibt die Zeichnung allein auf dem weißen Papier stehen.

Zehntes Kapitel.

Elektrische Laboratoriumsöfen.

1. Baustoffe.

a) Materialien für das Gerüst. Im folgenden sind die zum Bau von Öfen gebräuchlichen festen, elektrisch isolierenden Baustoffe einigermaßen nach steigender Feuerfestigkeit geordnet angegeben. Weitere Angaben über diese Materie finden sich bei R. Schwarz[1]) sowie in dem S. 423 angegebenen Buch von Henning.

„Diatomit." Ein von der Firma Grünzweig & Hartmann, Ludwigshafen hergestelltes, in Form und Farbe gebrannten Ziegelsteinen ähnliches, aber hochporöses (leichtes) Isolationsmaterial. „Diatomitschalen", die zur Isolation von Dampfleitungen benutzt werden, schmiegen sich

[1]) R. Schwarz, „Feuerfeste und hochfeuerfeste Stoffe". Sammlung Vieweg.

Zylinderflächen von 8—30 cm Durchmesser an und eignen sich wegen ihrer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit, ihres geringen Preises und ihrer leichten Bearbeitbarkeit vorzüglich zur Umkleidung von Öfen. Bei heller Rotglut sintert die Masse jedoch zusammen und ist daher nur bis etwa 500° brauchbar.

Asbest. Brauchbar bis 1000°. Feuchtet man Asbestpappe mit Wasserglaslösung an, so erlangt sie nach dem Trocknen eine erhebliche Starrheit. Indifferent gegen starke Temperaturschwankungen.

Porzellan. Verschiedene Sorten halten Höchsttemperaturen von 900—1300° aus. Ziemlich beständig gegen Temperaturschwankungen. Schmelzpunkt etwa 1600°. Nach RIEKE[1]) sind Porzellanrohre bis 1300° „gasdicht". Bezugsquelle: Staatliche Porzellanmanufaktur Berlin NW 23, Wegelystr. 1 (im folgenden als „Berliner Porzellanmanufaktur" angegeben); Ströhlen & Co., Stuttgart.

Quarzgut und Quarzglas. Brauchbar bis 1100°; Quarzglas sowie das Quarzgut mit glatter Oberfläche sind bis 1200° hochvakuumdicht, bei dieser Temperatur wird ein evakuiertes Rohr durch den äußeren Überdruck langsam deformiert. Schmelzpunkt ca. 1700°. Bei längerer Benutzung über 1000° entglast das Material, es wird brüchig und gasdurchlässig. Gegen schroffen Temperaturwechsel ist es vollkommen unempfindlich.

MARQUARDTsche Masse. Eine von der Berliner Porzellanmanufaktur hergestellte, aus Kaolin und Tonerde bestehende keramische Masse, brauchbar bis 1400°, Schmelzpunkt 1850°, nicht gasdicht, ziemlich beständig gegen Temperaturschwankungen.

Pythagorasmasse. Nach Angaben der Porzellanmanufaktur W. Haldenwanger, Spandau, Heerstraße, brauchbar bis 1650—1700°, gasdicht bis 1200°. Gegen Temperaturschwankungen erheblich beständiger als Hartporzellan. (Wenn allerdings ein glühendes Rohr in Wasser getaucht wird, so springt es.) Schmelzpunkt: 1770°. — Dieses noch ziemlich wenig bekannte, aus geschmolzener Tonerde (Korund) bestehende Erzeugnis, aus dem auch komplizierter geformte Gegenstände hergestellt werden können, scheint sehr beachtenswert zu sein. Lieferbar sind z. B. 1—2 m lange Rohre von 0,4 mm innerem und 1,0 äußerem Durchmesser an bis zu 70 mm Innen- und 80 mm Außendurchmesser, am Ende offen oder geschlossen; ferner Tiegel und Schiffchen.

Spinellmasse (28% Magnesiumoxyd, 72% Aluminiumoxyd). Brauchbar bis 1700°. Schmelzpunkt (nach SCHWARZ l. c.) 1825° C. Bezugsquelle: Berliner Porzellanmanufaktur. Nach HENNING (l. c.) gasdicht bis 1800° C.

Tonerde (Aluminiumoxyd) Brauchbar bis 1800°, Schmelzpun 2050°. Bezugsquelle: Heraeus, Hanau. Empfindlich gegen schro Temperaturänderungen.

Magnesiumoxyd. Brauchbar bis 1800°, Schmelzpunkt 280C noch empfindlicher gegen Temperaturänderungen wie Tonerde. I Vakuum verdampft Magnesia schon bei 1700° merklich. Nicht gasdicl Bezugsquelle · Berliner Porzellanmanufaktur; Elektroschaltwerk Gö tingen

Zirkondioxyd. Schmelzpunkt nach einer neuen Bestimmung v HENNING[3]) (2690 ± 20)° C Unempfindlich gegen Temperaturwechs wie Quarzglas, sehr indifferent gegen chemische Einwirkungen, namen lich gegen starke Basen. Bis 2000° ein verhältnismäßig guter Isolat Die Steatit-Magnesia A. G., Berlin-Pankow, stellt „Zirkondioxyd"-Tieg und -Rohre her, die jedoch bei 1850° C zu erweichen und bei 2000° zu schmelzen beginnen.

In der zitierten Arbeit bestimmte HENNING den Schmelzpunkt v Hafniumoxyd zu (2810 ± 20)° C Doch wird dieses Oxyd wegen sein Seltenheit für den vorliegenden Zweck wohl nie in Betracht kommen.

Borstickstoff. Schmelzpunkt nach SCHWARZ, dessen Buch d folgenden Angaben entnommen sind, über 3000° C. Von Sauerstoff un Wasserdampf wird Bornitrid über 700° angegriffen, von Metallen b höheren Temperaturen unter Bildung von Boriden zersetzt Mit Koh reagiert er dagegen erst bei 2000°. Die Widerstandsabnahme mit E höhung der Temperatur ist bei Borstickstoff noch kleiner als bei de übrigen angegebenen Isolatoren, bei 2000° beträgt der Widerstand d Zentimeterwürfels 1900 Ω

Kohle siehe bei „Kurzschlußöfen", Seite 457.

b) Pulverformige Fullstoffe Bis ca. 1300° ist vorzüglic Kieselgur wegen seiner sehr geringen Wärmeleitfähigkeit. Der b 1600° liegende Erweichungspunkt der Kieselsäure gestattet nicht, da Material für höhere Temperaturen zu benutzen.

Bis 1600° empfiehlt sich Kaolinerde oder Schamottekörne (Berliner Porzellanmanufaktur)

Bis 1800° reine Tonerde (Aluminiumoxyd), bis ca. 2600° Magne siumoxyd („gebrannter Magnesit"), das allerdings ein verhältnis mäßig hohes Wärmeleitvermögen besitzt, für noch höhere Temperaturen unter den oben angegebenen Einschränkungen, Borstickstoff.

Ein beliebtes, bis zu sehr hohen Temperaturen brauchbares Füll material ist Kohle — Holzkohle in kleinen Stücken, zerstoßene Ab

fälle von Bogenlampenkohlen, gekörnte Kohle, die unter der Bezeichnung „Kryptol“ z. B. von der Berliner Porzellanmanufaktur bezogen werden kann. Auch Karborundum (Siliciumkarbid) wird von einigen empfohlen.

c) Metalle für Drahtöfen, gleichfalls nach steigender Gebrauchstemperatur geordnet.

Für niedrige Temperaturen von 300—400°, wie sie z. B. zum Ausheizen von Vakuumröhren benötigt werden, ist sehr brauchbar Eisendraht, dessen hoher Temperaturkoeffizient einigermaßen eine automatische Temperaturregulierung besorgt. Ein eisenhaltiges, billiges Widerstandsmaterial von fünffach kleinerem Temperaturkoeffizienten und fünffach größerem spez. Widerstand ist das „Ferrohm“ von Schniewindt; brauchbar bis 400°.

Für mittlere Temperaturen von 900° bis höchstens 1100° kommen vor allem die Chromnickellegierungen in Frage, die z. B. von der oben genannten Firma C. Schniewindt G. m. b. H., Neuenrade in Westfalen, hergestellt werden. Eine dauernde Betriebstemperatur von 1100° hält z. B. die Legierung „Pyrostan“ dieser Firma aus. (Schmelzpunkt 1425°.)

Bis 1600° ist brauchbar Platin, das sich durch hohen Schmelzpunkt (1764°) und weitgehende chemische Unangreifbarkeit, leider aber auch durch sehr hohen Preis auszeichnet.

Für die höchsten Temperaturen kommen Molybdän und Wolfram in Frage, die allerdings in einer reduzierenden Atmosphäre oder im Vakuum erhitzt werden müssen. Mit Molybdändrahtöfen wurden „ohne Schwierigkeit“ 1800 erreicht, mit einem weiter unten beschriebenen Wolframofen maximal (bei längerem Betrieb) 3200° abs.

Ebenso hohe Temperaturen lassen sich mit Kohlerohröfen erhalten.

2. Beschreibung einiger Typen.

a) Einen Drahtofen für Temperaturen bis zu 1000° stellt man in sehr einfacher Weise her, indem man auf ein Porzellanrohr (besser: Rohr aus Pythagorasmasse) einen Chromnickeldraht aufwickelt. Der Durchmesser des Drahtes soll möglichst nicht unter 1 mm sein, die Windungen ziemlich eng liegen (etwa $^1/_2$ mm Abstand). Die fertige Wicklung wird mit einem Brei aus Talkum und Wasserglas bestrichen und durch Strom geheizt, bis der Kitt erstarrt ist. Die Drahtenden verdrillt man ca. 10 cm weit mit dickeren Zuführungsdrähten aus Kupfer. Dann wird das Rohr in einen aus Diatomitschalen gebildeten Zylinder gestellt, die Drähte durch Löcher nach außen geführt und der 1—4 cm weite Zwischenraum mit Kieselgur ausgestopft. Endlich werden die Stirnflächen und der Zylindermantel durch mit Wasserglas aufgekittete Asbestpappe

Chromnickel-Drahtöfen liefert das Elektroschaltwerk Göttingen, Platindraht oder -band-Öfen Heraeus in Hanau.

Einen Molybdänofen beschreibt PAKULLA[4]). Heizraum 35 mm Durchmesser, 150 mm Höhe. Molybdändraht von 1 mm Durchmesser, in reine Tonerde eingebrannt, Vakuum, bei 1800° 85 Volt und 17 Amp

v. Wartenberg, Broy und Reinicke[5]) stellten einen kleinen Wolframofen her, indem sie einen im Bunsenbrenner glühend gemachten Wolframdraht von 1,1 mm Durchmesser auf einen Stahldorn wickelten. Sie erhielten so eine Spirale aus 10 Windungen von 5,5 mm lichter Weite. In diese wurde ein Röhrchen aus Zirkonoxyd hineingesteckt, das sie herstellten, indem sie das mit Stärkekleister versetzte Oxyd in der Knallgasflamme brannten. Die äußere Umhüllung der Spirale wird nicht beschrieben. Der Ofen gab bei 120 Amp. und 11 Volt in einer Wasserstoff- oder Stickstoffatmosphäre stundenlang 2500°

Ein Wolframofen des Laboratoriums der Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung (Osram-Konzern) wird von FEHSE[6]) beschrieben. Er besteht aus einem Wolframrohr von 10 cm Länge, 1 cm Innendurchmesser und 1 mm Wandstärke, das in einer Atmosphäre von „Formiergas" (25% Wasserstoff, 75% Stickstoff) geglüht wird. Auf eine Einhüllung in wärmeisolierendes Material wird also hier verzichtet. Als Strahlungsschutz dienen zwei konzentrisch angeordnete Molybdänbleche, die von einem wassergekühlten Mantel umschlossen sind. Die Abhängigkeit der Temperatur von der zugeführten Energie ist in einer Tabelle angegeben, aus der drei Werte angeführt seien:

1500° absolut	386 Ampere	1,62 Volt
2600° „	865 „	5,45 „
3000° „	1080 „	7,4 „
3200 Maximum für längeren Betrieb.		

b) Kryptolöfen. Unter „Kryptol" versteht man gekörnte Kohle, die z. B von Gebr. Siemens & Co., Lichtenberg bei Berlin („Körnung S2") oder von der Berliner Porzellanmanufaktur bezogen werden kann. Das Kohlegrieß wird in den zylindrischen, das Heizrohr umgebenden Raum zwischen den beiden Zuführungselektroden aus Kohlenplatten oder Eisenblechen eingefüllt. PAKULLA beschreibt in dem oben erwähnten Bericht einen selbsthergestellten Kryptolofen, der, an das 220-Volt-

[4]) E. PAKULLA, Bericht Nr. 51 der Fachausschüsse der Eisenhüttenleute, Düsseldorf 1924.

[5]) H. v WARTENBERG, J. BROY und R. REINICKE, ZS. f. Elektrochemie 29, 214. 1923.

Netz angeschlossen, bei 17 Amp. 1600—1700° ergab. Zwei Modelle von größeren Öfen stellt die Berliner Porzellanmanufaktur her. Höchsttemperatur: 1800°, elektrische Energie bis 14 kW. Diese Öfen sind nur für vertikale Stellung des Heizrohres geeignet.

c) „Kurzschlußöfen." So bezeichnet man Öfen, bei denen die JOULEsche Wärme in dem relativ kurzen und dickwandigen Heizrohr aus Kohle, Graphit oder Silit erzeugt wird. Sie verlangen daher bei niedrigen Spannungen sehr hohe Stromstärken, d. h. einen Niederspannungstransformator. Die Stromzuführung erfolgt entweder durch 3—4 cm dicke Kohlescheiben von etwa 12 cm Durchmesser, die, in 2—4 Segmente zerschnitten, die Enden des Kohlerohres umfassen, oder durch wassergekühlte Kupferbacken. Die Herstellung eines solchen Ofens ist nicht schwierig, wenn man ihn als Verbrauchsgegenstand betrachtet, der, wenn er bei mehreren Versuchen seine Schuldigkeit getan hat, erneuert werden muß. Gebräuchliche Dimensionen für die Kohlerohre sind 20—40 mm Innendurchmesser, 3—5 mm Wandstärke, 150—300 mm Länge. Kohlerohre liefert z. B. die Firma C. Conradty in Nürnberg, fertige Öfen mit Ersatzteilen, auch Niederspannungstransformatoren das Elektroschaltwerk Göttingen. Nach Angabe dieser Firma lassen sich mit denselben „2000° und mehr" erreichen. Nach TAMMANN benötigt man für Temperaturen von 2000° ca. 2 Amp./mm². Bekanntlich hat KING[7]) bei seinen spektroskopischen Versuchen einen derartigen Kohlerohrofen benutzt, der evakuiert werden konnte. Um dies zu ermöglichen, war der Ofen auf einer kräftigen Grundplatte aufgebaut, durch die alle Zuführungen für Strom und Kühlwasser vakuumdicht hindurchgeführt waren. Eine mit zwei Fenstern versehene Haube konnte von oben über den Ofen gesenkt und mit der Grundplatte verschraubt werden. KING gibt als Höchsttemperatur 3200° C an.

d) Lichtbogenöfen sind im Laboratorium des Physikers anscheinend wenig gebräuchlich, vermutlich, weil sich dieselbe Wirkung z. B. mit den beschriebenen Kurzschlußöfen in einfacherer Weise erreichen läßt. Ein Modell, das der Verfasser konstruierte und zu spektroskopischen Untersuchungen benutzte, ist in den Annalen der Physik beschrieben[8]). Auf einem eng begrenzten Raum ließen sich Temperaturen von etwa 2500° C erreichen. Ein größeres Modell beschreibt PAKULLA in der oben erwähnten Arbeit. Er erhielt mit dem Ofen in 40—50 Minuten bei 30—35 Amp. und 80—120 Volt 1600.

---

[7]) A. S. KING, Astrophys. Journ. 28, 300, 1908. Contributions from the Mount Wilson Observatory Nr. 28 und Nr. 66.

Ebenso scheinen die Induktionsöfen, die auf Wirbelstromheizung beruhen und die für die Metallurgie große Bedeutung erlangt haben, nur sehr selten benutzt zu werden[9].

e) Endlich möge der von GERDIEN[10] angegebene Kathodenstrahlofen erwähnt werden, bei dem das Schmelzgut durch den Aufprall von Kathodenstrahlen erhitzt wird. Diese werden durch Hochfrequenzstrom erzeugt, und zwar wirkt als Kathode die innere Oberfläche der Glaswand eines großen Kolbens (bis 50 cm Durchmesser), dessen Außenwand durch ein Bad von angesäuertem Wasser mit der Stromquelle verbunden ist (Der Kolben steht mit dem Hals nach unten in einem Gefäß mit Wasser.) Die relativ kleine Anode befindet sich in der Mitte der Glaskugel. GERDIEN verwendete Energien von 300 Watt bis zu 4 kW, Spannungen bis zu 30 000 Volt und Stromstärken (in dem Kolben) bis zu 20 Amp. Der günstigste Druck war 0,01 mm Quecksilber. Es gelang mit dieser Apparatur, in 5 Sekunden ein 2 cm langes Stück eines Wolframbarrens von 6 × 6 mm Querschnitt zu schmelzen.

Konstante Temperaturen von − 180 bis + 500° erzielt man mit verschiedenen Temperaturbädern und Thermostaten. Die Technik dieser Apparate ist in dem mehrfach erwähnten Buch von HENNING so eingehend beschrieben, daß der Verfasser nichts wesentlich Neues hinzuzufügen hat.

Elftes Kapitel.

Kolloidale Lösungen.

Viele Rezepte zur Herstellung kolloider Lösungen der verschiedensten Substanzen finden sich in dem Buch von SVEDBERG[1]), manche in der Literatur zerstreut. Hier seien nur einige Vorschriften angegeben, die nach den Erfahrungen des Verfassers auch dem mit der chemischen Technik wenig vertrauten Physiker ohne weiteres gelingen dürften. Es sei daran erinnert, daß sehr viele Flüssigkeiten, z. B. Kaffee, Tee, Bier, die Lösungen vieler Farbstoffe usw. „kolloidale Lösungen" sind und vielfach im Ultramikroskop lebhafte BROWNsche Bewegung zeigen.

1. Kolloidale Mastixlösung. Mastix wird in Alkohol gelöst und einige Tropfen bis einige Kubikzentimeter dieser klaren Lösung in destilliertes oder gewöhnliches Wasser gegossen. Die trübe Lösung zeigt z. B. starken Tyndalleffekt.

[9]) Vgl. G. RIBAUD, C. R. 180, 1733. 1925.

[10]) H. GERDIEN, Wiss. Veröff. d. Siemenskonzern 8, 226. 1929.

[1]) The SVEDBERG, Methoden zur Herstellung kolloidaler Lösungen. Steinkopff

2. Kolloidale Lösungen von allen Edelmetallen können nach BREDIG[1]) durch Zerstäubung im Lichtbogen unter Wasser gewonnen werden. Die Pole der Lichtleitung werden unter Vorschaltung eines Widerstandes zu zwei starken Drähten aus dem betreffenden Metall geführt, die Kurzschlußstromstärke auf 3—8 Amp. einreguliert und dann die Drähte unter destilliertem Wasser ständig zur Berührung gebracht und voneinander entfernt. Nach einigen Minuten ist die zarte Trübung des Wassers merklich, nach längerer Zeit ist die Flüssigkeit graubraun geworden. Diese Lösungen zeigen im Ultramikroskop Teilchen von sehr verschiedener Größe (bei Silber prachtvolle Farben!), sie sedimentieren jedoch schon nach wenigen Wochen.

3. Kolloidales Tellur. Man lötet einen kleinen Tellurkristall (mit Zinnlot) an die Spitze eines Leitungsdrahtes und bringt diesen als Anode in ein Gefäß mit Wasser. Als Kathode dient ein Draht von beliebigem Material. Bei Verbindung der Elektroden mit der Lichtleitung stößt das Tellurstückchen kleine, dichte Wolken von braunem, kolloidalem Tellur aus, die bei einer schwachen Strömung der Flüssigkeit in der Projektion Ähnlichkeit mit der Rauchfahne eines Fabrikschornsteines haben. Die Leitfähigkeit von destilliertem Wasser ist für den Versuch häufig zu gering, die von gewöhnlichem schon zu groß. Man beginnt zweckmäßig mit destilliertem Wasser und setzt allmählich gewöhnliches zu, bis der Effekt besonders gut ist.

4. Rote Goldlösung. Während die Reduktion einer Chlorgoldlösung mit Formaldehyd, Phosphorlösung, Phenylhydrazin nur bei sehr reinen Substanzen und nur bei Einhaltung genauer Vorschriften zu roten Lösungen führt, zeichnet sich ein von OSTWALD[3]) angegebenes Rezept dadurch aus, daß es, wie W. OSTWALD sagt, „immer geht“. Man löst eine Messerspitze Tannin (Gerbsäure, in Apotheken erhältlich) in etwa 50 ccm Wasser; ferner 1 g (gelbes oder braunes) Chlorgold in 100 ccm Wasser. Einige Kubikzentimeter der Chlorgoldlösung gießt man in ein sehr kleines Becherglas. Bei der Prüfung mit Lackmuspapier findet man, daß sie sauer reagiert, d. h. blaues Lackmuspapier rötet. Man setzt nun so lange eine starke Lösung von doppeltkohlensaurem Kalium in kleinen Portionen zu, bis frisches blaues Lackmuspapier nicht mehr rot wird. — Zur Herstellung der kolloidalen Lösung erhitzt man 100—200 ccm destilliertes Wasser in einer Kochflasche, gießt gleichzeitig einige Tropfen der neutralisierten Goldchloridlösung ein, schüttelt und gibt einige Tropfen der Tanninlösung zu. Wenn sich die Lösung erwärmt, entsteht

[1]) BREDIG, ZS. f. angew Chem. 11. 951 1898.

eine zarte rote Färbung von kolloidalem Gold, und nun kann man unt
häufigem Schütteln tropfenweise abwechselnd immer mehr Gold- un
Tanninlösung zugeben, bis die Farbe fast schwarzrot geworden ist. -
Das gewonnene prachtvoll weinrote Sol ist sehr haltbar, die Teilche
sind aber zu klein, um im Ultramikroskop ein effektvolles Bild zu geber

Das eindrucksvollste Demonstrationsobjekt für die BROWNsch
Bewegung (grüne Teilchen) liefert die nach dem Rezept von ZSIGMOND
hergestellte Goldlösung, die jedoch reinste Chemikalien, vor allem seh
reines, frisch destilliertes Wasser und nicht zu altes Formaldehyd er
fordert. Zu ihrer Herstellung bereitet man folgende Lösungen:

A. 1 g gelbes Chlorgold in 167 ccm destill. Wasser.
B 1 g Kaliumkarbonat purissimum in 67 ccm destill. Wasser.
C. 1 ccm Formaldehydlösung (käuflich, 35—40 proz) auf 300 ccm dest. Wasser

Man erhitzt 240 ccm reinstes Wasser in einem Erlenmeyerkolben au
Jenaer Glas von 400 ccm zum Sieden und fügt während des Erhitzen
5 ccm A und 6—7 ccm B hinzu Unmittelbar nach Beginn des Sieden
gießt man unter heftigem Schwenken des Kolbens schnell aber partien
weise 6—10 ccm C hinzu. Nach einigen Sekunden erfolgt die Reaktion
die Lösung färbt sich schwach violett oder rosa und dann prachtvol
weinrot

5. Blaue Goldlösung (in der Aufsicht braungelb), gelbe, sehr hell
Teilchen. Man löst 0,5 g (gelbes oder braunes) Chlorgold in etwas Wasser
neutralisiert mit einigen Tropfen Sodalösung, wie S. 459 beschrieben, und
verdünnt mit reinstem Wasser auf 500 ccm. Dazu setzt man unter
Schütteln 1—2 ccm einer 0,05 proz Lösung von Hydrazinhydrat. Zuviel
Hydrazinhydrat gibt Sole mit zu großen Teilchen, die im auffallenden
Licht Goldglanz haben und bald sedimentieren.

6. Kolloidales Platin. Leicht herstellbar nach der unter 4. angegebenen OSTWALDschen Vorschrift. Nur verwendet man statt der Goldchlorid- eine Platinchloridlösung (eigentlich: Platinchloridchlorwasserstoffsäure), die gleichfalls mit Kaliumbikarbonat neutralisiert wird. Ein Unterschied besteht nur darin, daß man hier längere Zeit (1/4 Stunde) fast bis zum Sieden erhitzen muß, bis sich die Lösung zart braun färbt Durch längeres Erhitzen und wechselweise Zugabe von Platin und Tannin wird sie bald nahezu schwarz.

7. Kolloid mit langgestreckten Teilchen[4]. Man löst 5 g Wolframsäure in etwa 100 ccm destilliertem Wasser, schüttet die Lösung in ein

[4]) A. LOTTERMOSER, van Bemmelen-Gedenkbuch 1910. 154f Phys. 78 17

›cherglas von etwa 2 l Inhalt, fügt so viel (verdünnte) Salzsäure zu, ›ß die Lösung stark sauer reagiert und füllt das Glas mit destilliertem ›asser auf. Beim Zugeben der Säure bildet sich ein gelblichweißer, ›llertartiger Niederschlag, der zunächst das ganze Glas erfüllt, sich ›er allmählich einigermaßen absetzt. Man gießt die klare Flüssigkeit ›, füllt wieder mit destilliertem Wasser auf und wiederholt dies mehrere ›ale Dabei nimmt der Niederschlag mehr und mehr an Volumen ab ›d bildet allmählich nur einen ganz geringen gelblich-weißen Satz auf ›m Boden des Gefäßes. Man wäscht noch einige Male mit destilliertem ›asser und beobachtet dabei, daß der aufgerührte Niederschlag eigen-›tig seidenglänzende Strömungslinien bildet. Schließlich gießt man ›ch dem Absitzen den größten Teil des Wassers fort und bewahrt das ›wonnene „Wolframsäuresol" in einer kleinen Flasche auf. — Das ›rdünnte Sol zeigt im Ultramikroskop stark funkelnde, lichtstarke ›ilchen.

8. **Kolloidbildung im Gesichtsfeld des Kardioidultramikroskopes.** (Nach ›EDENTOPF.) Man bereitet eine ca. 25 prozentige Lösung von weißem ›osphor in Schwefelkohlenstoff. Die Lösung entzündet sich sehr leicht › der Luft und muß daher mit großer Vorsicht behandelt werden. Der ›osphor ist zunächst kristalloid gelöst, bei der intensiven Belichtung › Ultrakondensor bildet sich jedoch kolloidaler roter Phosphor. Das ›sichtsfeld erscheint im ersten Augenblick klar, dunkel; sofort aber ›lden sich Submikronen, die wie Schneeflocken wirbeln, sich schnell ver-›ößern und dann an den Wandungen ankleben. Nach einigen Sekunden › das Gesichtsfeld blendend hell geworden, man verschiebt dann den ›bjekttisch, und an einer benachbarten Stelle beginnt das Spiel von neuem.

9. **Verschieden gefärbtes kolloidales Silber.** LÜPPO-CRAMER[6]) hat eine ›gante Methode angegeben, um in einfacher Weise Gelatineplatten her-›stellen, die durch kolloidales Silber von verschiedener Teilchengröße ›rschiedene, zum Teil sehr leuchtende Farben besitzen.

›5 g Emulsionsgelatine werden einige Stunden in oft gewechseltem, ›stilliertem Wasser gewaschen, dann läßt man abtropfen und setzt ›0 ccm destilliertes Wasser zu. Gelatinelösung G.

25 g Gelatine werden mit 250 ccm destilliertem Wasser übergossen und ›rch Erwärmen geschmolzen. Lösung K.

	A	B	C	D
›n wiegt ab ›d löst in	1,75 Silb.-Nitrat 1,75 dest. Wass.	1 gelb. Dextr. 10 dest. Wass.	1 Natr.-Hydroxyd 10 dest. Wass.	1 Hydrochin. 10 Alkohol.

Man mischt B mit C, gibt 23 ccm Wasser und zuletzt, unter Schütteln, 7,5 ccm von A hinzu. Es entsteht eine tiefschwarze kolloidale Silberlösung. 10 ccm dieser Lösung werden auf 300 ccm verdünnt: Silbersol SS.

G wird auf 30° erwärmt und dadurch die Gelatine geschmolzen. Dazu setzt man den Rest (10 ccm) von A. Man teilt diese Flüssigkeit (GA) in fünf Portionen, die in fünf Bechergläser gegossen werden.

	I	II	III	IV	V
	50 ccm GA	50 ccm GA	50 ccm GA	50 ccm GA	50 ccm GA
dazu	0 ccm SS	0,25 ccm SS	1 ccm SS	2,5 ccm SS	5 ccm SS
und	2 ccm D	2 ccm D	2 ccm D	2 ccm D	2 ccm D

Nach 20 Minuten ist die Reaktion beendet. In der Durchsicht ist

I	II	III	IV	V
graublau	blau	rot	gelbbraun	grün

Größte Teilchen — Kleinste Teilchen.

Man gibt zu jeder Portion noch 50 ccm K, gießt die Flüssigkeit auf Glasplatten und läßt eintrocknen, wodurch man beträchtlich schönere Farben erzielt

Zwölftes Kapitel.

Galvanoplastische Metallüberzüge.

Der größte Teil der im folgenden angegebenen Rezepte ist dem sehr ausführlichen, von STOCKMEIER geschriebenen Artikel „Galvanotechnik" im 5. Band der Enzyklopädie der technischen Chemie (1917) entnommen.

Die Metallüberzüge haften in der Regel nur fest auf sorgfältig gereinigten Metalloberflächen. Die Reinigung erfolgt entweder mechanisch mit einer Bürste aus Messing- oder Stahldrähten oder chemisch: Stahl, Eisen, Messing, Kupfer und Nickel badet man dazu in 10 proz. Ätznatronlösung, Blei, Zinn, Zink in 3 proz Sodalösung. Für blanke (polierte) Oberflächen empfiehlt sich die Säuberung mit „Wiener Kalk", der mit Wasser zu einem dünnen Brei angerührt wird. „Wiener Kalk" ist gebrannter Dolomit (Calcium-Magnesiumoxyd); er zieht an der Luft Wasser und Kohlensäure an und ist daher verschlossen aufzubewahren. Kupfer und seine Legierungen können — besonders, wenn man fest haftende Silber- oder Goldüberzüge wünscht — in einem Bad von 1 g Kalium-Quecksilbercyanid und 2 g Cyankalium auf 1 l Wasser ganz dünn amalgamiert werden.

A n t i m o n. Man löst 125 g Pottasche in der 5fachen Wassermenge,

unter ständigem Erhitzen bis zur völligen Lösung ein. Diese Lösung wird auf 1 l verdünnt. Anode. Gegossene Antimonplatte. Stromstärke 0,35 Amp/qdm.

Blei. Überzüge aus Blei sind nur schwer herzustellen. Da die Angaben in der Literatur (z. B. in verschiedenen Patentschriften) nur allgemein gehalten sind, kann eine gute Vorschrift nicht gegeben werden.

Cadmium. 50 g Kalium-Cadmiumcyanid, 10 g Cyankalium, 1 l Wasser. Man elektrolysiert bei 60—70° mit 0,5 Amp/qdm.

Chrom. Nach Liebreich elektrolysiert man eine Lösung von 220 g Chromsäure in 1 l Wasser bei Zimmertemperatur. Anode: Platin; Stromstärke: 50 Amp/qdm.

Eisen. 1 kg Eisenchlorür, 1 l Wasser. Man elektrolysiert bei 70° mit 3—4 Amp/qdm und kann so in 2 Tagen 2 mm dicke Eisenüberzüge erhalten. Die Kathode (oder der Elektrolyt) muß bewegt werden.

Elektrolyteisen wegen seines Wasserstoffgehaltes sehr brüchig. Benutzt man eine Lösung von 600 g Eisenchlorür und 607 g Chlorcalzium in 1 l Wasser und elektrolysiert bei 110° mit 20 Amp/qdm, so erhält man geschmeidiges Elektrolyteisen mit geringem Wasserstoffgehalt.

Gold. 10 g Goldchlorid, 20 g Cyankalium, 1 l Wasser, 0,2—0,25 Amp/qdm; Zimmertemperatur. Viel schönere Überzüge erhält man bei normaler Temperatur mit Bädern, die Knallgold enthalten. Da dieses jedoch äußerst explosiv und deshalb mißlich herzustellen ist, sei ein gleichfalls sehr schön arbeitendes Bad ohne Knallgold angegeben, das jedoch zum Gebrauch auf 70° erhitzt werden muß.

Man löst 2 g Cyankalium, 12 g Natriumsulfit und 60 g Dinatriumsulfat in 750 ccm Wasser; ferner 2 g (käufliches) Chlorgold in 250 ccm Wasser und vereinigt dann beide Flüssigkeiten. Stromdichte: 0,3 Amp/qdm. (Zum Vergolden von Stahl und Eisen nimmt man statt 2 g nur 1 g Cyankalium.)

Kobalt. 60 g Kobalt-Ammoniumsulfat, 30 g Borsäure, 1 l Wasser. Zimmertemperatur; 0,4 Amp/qdm.

Kupfer. Man löst 10 g Natriumkarbonat, wasserfrei, 20 g Natriumsulfat, wasserfrei, 30 g Kupfer-Kaliumcyanür (Kahlbaum) und 1 g Cyankalium in 750 ccm Wasser; ferner 20 g Natriumbisulfit in 250 ccm Wasser und vereinigt die beiden Lösungen. — 0,3 Amp/qdm bei 20°.

Sehr schöne Überzüge soll auch eine Lösung von 100 g äthylschwefelsaurem Kupfer und 100 g Kupfersulfat in 1 l Wasser ergeben. Angaben über Stromdichte und Temperatur fehlen jedoch.

Mangan. Nach B. Dietz (Diss. München, 1922) erhält man glatte Niederschläge bis zu 0,5 mm Dicke (in 30 Minuten) von 99,92 proz.

und 26,56 g Ammoniumchlorid in 100 ccm Wasser und elektrolysiei bei 30° mit 25 Amp/qdm Anode: Platin.

Nickel. 55 g Nickelammoniumsulfat krist, 40 g Borsäure, 1 l Wasse Mindestens 18°; 0,5 Amp/qdm. — Oder 40 g Nickelsulfat, 35 g zitroner saures Natrium, 1 l Wasser. — Oder 50 g Nickelsulfat, 25 g Ammoniun chlorid, 1 l Wasser. Zimmertemperatur, 0,5 Amp/qdm

Palladium 1 g Palladiumchlorür, 10 g Ammoniumphosphat, 50 Natriumphosphat, 0,5 g Benzoesäure, 200 ccm Wasser. Angaben übe Temperatur und Stromdichte fehlen

Platin, blankes Dichte Überzüge, die in ihrem Aussehen an Nicke schichten erinnern, liefert folgendes Bad. Man bereitet eine schwac übersättigte Sodalösung, indem man die bei etwa 35° gesättigte Lösun vom Bodensatz abgießt In 200 ccm dieser Flüssigkeit löst man weiter 6—25 g „Platinchlorid" (Platinchlorid-Chlorwasserstoffsäure) und 7 b 34 g Natriumlaktat. Man elektrolysiert bei 45° mit 0,15—0,2 Amp.

Platinschwarz. Rezept von Lummer und Kurlbaum. Man lös 0,4 g Bleiacetat in 200 ccm Wasser und mischt 8 ccm dieser Lösung m 52 ccm Wasser und 2 g „Platinchlorid". Zimmertemperatur; 10 Minute lang 30 Milliampere pro cm^2 Es lassen sich nur Platin- und Silberobe flächen schwarz verplatinieren Die Reinigung der Flächen erfolgt i einfacher Weise dadurch, daß man zunächst die Stromrichtung umkehr Die Anode wird nicht angegriffen, daher wird die Lösung allmählic verbraucht.

Silber. 46 g Silberkaliumcyanid, 11 g Cyankalium, 1 l Wasse Temperatur: etwa 18°, Stromdichte 0,3 Amp/qdm. Besonders weiß Überzüge soll folgendes Bad geben: 30—50 g Silbernitrat, 30—50 milchsaures Ammonium, 1 l Wasser. 0,6—0,8 Amp/qdm; Zimmertempe ratur

Auf einfachste Weise erhält man einen (allerdings sehr dünner Silberüberzug mittels der sog. „Anreibeversilberung", die im wesen lichen aus Chlorsilber und Seignettesalz (Kalium-Natriumtartrat) be steht und in Metallhandlungen käuflich ist. Man verrührt etwas von de Pulver mit Wasser zu einem Brei und reibt diesen mit einem Läppche auf die zu versilbernde (Messing-)Fläche.

Vanadium. Cowper-Coles[1]) gibt folgende Vorschrift zur E zeugung dicker, glänzender Vanadiumüberzüge: 10,9 g Vanadiumsäu (V_2O_5) und 12,5 Ätznatron werden in 1 l Wasser gelöst und dann 200 Salzsäure (konz.?) hinzugefügt 20—22 Amp/qdm; 82°. (Die Lösun darf nie mehr als 0,714% Vanadiumoxyd enthalten.)

Wolfram. Überzuge von Wolfram sind sehr schwer herzustellen. Nach einem 1925 von der Firma „Philips Gühlampenfabrik" in Holland ausgearbeiteten Verfahren[7]) schmilzt man 38% Natriumwolframat (Na_2WO_4), 32% Lithiumwolframat (Li_2WO_4) und 30% Wolframsäure (WO_3) im Porzellantiegel zusammen und elektrolysiert mit 20 bis 80 Amp/qdm bei 1020°. Bei 835° waren die Ergebnisse schon wesentlich schlechter Das Wolfram schlägt sich gut nur auf Kupfer und Nickel nieder, schlecht auf Eisen, Silber und Palladium. Man erhält in 10 bis 30 Minuten sehr fest haftende Überzüge von 0,03—0,1 mm Dicke. Nach dieser Zeit muß man die Kathode mit einer Stahldrahtbürste reinigen und kann dann neuerdings elektrolysieren. Aus welchem Metall die Anode bestehen soll, wird nicht angegeben.

Zink. Die Herstellung von Zinküberzügen ist wegen des elektropositiven Charakters dieses Metalles mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Nach CLASSEN (DRP. 183 972) ist folgendes Bad empfehlenswert: 100 g Zinksulfat, 40 g krist. Natriumsulfat, 5 g Zinkchlorid und 2,5 g Borsäure werden in 500 ccm Wasser gelöst. Dazu setzt man 3 bis 4 g Glyzyrrhizin ammoniacale (z.B. bei Merck, Darmstadt, erhältlich). Stromdichte und Temperatur sind nicht angegeben. — Eine zweite Vorschrift ist. 10 g Zinkchlorid, 10 ccm Pyridin, Salzsäure bis zur Sättigung; Verdünnung auf 1 l. 0,2 Amp/qdm.

Zinn. Auch Zinnüberzüge sind schwierig herzustellen. — Man löst 17,5 g „geschmolzenes Zinnchlorür", 0,3 g Cadmiumchlorid, 35 g Natriumpyrophosphat in 1 l Wasser und elektrolysiert mit 0,25 Amp/qdm. Einen dünnen Zinnüberzug erzeugt man mit einer Lösung von 5 g Zinnchlorür und 1 g „Weinstein" (saueres weinsaueres Kalium) in 100 ccm Wasser. Man taucht einen Pinsel abwechselnd in diese Lösung und in Zinkstaub und bestreicht die zu verzinnende Oberfläche.

Dreizehntes Kapitel.

Verschiedene Kunstgriffe.

1. Herstellung von Leuchtschirmen.

Um die Auftreffstelle von Kathoden-, Kanal-, Röntgen- oder ultravioletten Strahlen sichtbar zu machen, verwendet man fluoreszierende Substanzen, die in feiner Verteilung auf einem Schirm festgeklebt werden. Durch besonders starke Fluoreszenz zeichnen sich folgende Körper aus:

Willemit, ein Zinksilikat (Zn_2SiO_4), in Stücken z. B. bei Kahlbaum erhältlich. Es wird in einer Reibschale zerstoßen und eignet sich für

Kathoden-, Kanal- und Röntgenstrahlen sowie [nach LYMAN[1])] fü das äußerste Ultraviolett. Die Fluoreszenzfarbe ist blau, die Nachleucht dauer nicht merklich.

Sidotblende (Zinksulfid) Das Leuchten wird vermutlich durc spurenweise (0,01 %) Verunreinigung mit Thallium und Ytterbium ver ursacht[2]). Sehr gutes Material ist bei Buchler & Co, Braunschweig, er hältlich. Vorzüglich für Kathodenstrahlen und Ultraviolett, auch fü Röntgenstrahlen. Hellgrüne Fluoreszenz, lange nachleuchtend.

Wolframsaures Calcium wird vorzugsweise für Kathoden- un Röntgenstrahlen benutzt („Rapidfolie" von Kahlbaum). Leuchtfarb blau, nicht nachleuchtend.

Kathodenstrahlen und ultraviolettes Licht erregen wohl die meiste Körper zum Leuchten. Besonders hell fluoreszieren z. B. die LENARD schen Phosphore (lange nachleuchtend), bei ultravioletter Bestrahlun ferner die Teerfarbstoffe Chrysen, Anthrazen, Äskulin, Fluoren sowi Fluoreszein (nicht nachleuchtend).

Das früher von LENARD für Kathodenstrahlen besonders empfohlen Pentadezylparatolylketon ist — ebenso wie Bariumplatincyanür fü Röntgenstrahlen — wohl überholt worden. TIEDE[3]) empfiehlt für Ka thodenstrahlen als stärkst leuchtende Substanz Borstickstoff; der Ver fasser hatte jedoch mit verschiedenen Präparaten nur Mißerfolge.

Die Herstellung der Schirme kann auf verschiedene Weise erfolgen Am einfachsten verrührt man die Substanz mit einem Klebemitte (z. B. Zaponlack, Wasserglas) und bestreicht den Schirm mit diese Paste. Dies hat jedoch den Nachteil, daß die Kriställchen in das Klebe mittel eingebettet sind, daß also die Strahlen dünne Schichten desselbe durchsetzen müssen. Oder man streut die Substanz auf den mit dem Kleb mittel bestrichenen Schirm. Die Kristalle sind dann nur an ihrer Unter seite festgeklebt. Zum Aufstreuen kann man ein sehr feinmaschige Drahtnetz oder ein Stück Leinwand benutzen, das man 20—30 cm übe den Schirm hält. Da der Überschuß nicht festklebt und wieder ge sammelt wird, darf man den Schirm dick und ungleichmäßig bestreuen Eine dritte, elegante Methode hat EVERETT[4]) angegeben. Man schwemm die Substanz in Alkohol auf, läßt die größeren Teilchen absitzen un gießt die Suspension dann in eine Schale, in welcher der Schirm liegt Wenn sich die feinen Teilchen abgesetzt haben, wird der Alkohol bis au

---

[1]) Th. LYMAN, Beibl. z. d. Ann. d. Phys. 31, 603. 1907.

[2]) T TANAKA, Journ. Opt. Soc. Amer. 8, 659. 1924.

[3]) E. TIEDE, Ber. d. D. chem. Ges. 53, 2209. 1920; ZS f. Elektrochemie 2[illegible]

einen kleinen Rest, den man verdunsten läßt, abgehebert. Diese Schirme zeichnen sich durch feines Korn aus und sind nicht so leicht verletzlich wie man erwarten sollte

Im speziellen empfehlen sich besonders

für Kanalstrahlen: EVERETTschirme mit Willemit,

für Kathodenstrahlen: Dieselben; auf Wasserglasanstrich aufgepudertes Willemit oder Sidotblende.

Für Röntgenstrahlen: Die vorzüglichen, im Handel befindlichen Schirme, z. B. Heyden-Ossal-Schirm, Kahlbaum-Rapidfolie u. a. m.

Für ultraviolettes Licht von etwa 4000—2000 Å. Eine mit Gelatineüberzug versehene, in einer Lösung von Fluoreszeinnatrium gebadete Glasplatte (hell, strukturlos, sehr transparent).

STEUBING[5]) verwendet eine Mattscheibe, die bis zu den kürzesten Wellenlängen und auch im Röntgengebiet fluoresziert, und die folgendermaßen hergestellt wird: Eine unbelichtet ausfixierte photographische Platte mit noch feuchter (gequollener) Schicht wird mit Uranylfluorid-Fluorammonium bestäubt und, solange die Platte noch feucht ist, das Pulver mit dem Finger zerrieben, so daß eine matte, feinkörnige Schicht entsteht.

Für sehr kurzwelliges Ultraviolett (Vakuumspektrograph): Everetschirm mit Willemit; Mattscheibe nach STEUBING.

2. Flüssigkeiten von hohem spezifischen Gewicht.

(Aus dem Katalog von KAHLBAUM, Berlin.)

Äthyljodid	1,94 g/ccm
Natriumquecksilberbromid (nach CLERICI)	2,9
Bromoform	2,904
Acetylentetrabromid (MUTHMANN)	2,97—3,0
Bariumquecksilberbromid (CLERICI)	3,05
Kaliumquecksilberjodid (THOULET)	3,17
Borwolframsaures Cadmium (KLEIN)	3,28
Methylenjodid	3,32
Bariumquecksilberjodid (ROHRBACH)	3,56
Thalliumsilbernitrat (Schmelzp. 75°)	4,5

3. Magnetische Felder bis zu $1^1/_2$ Millionen Gauß erzeugt für sehr kurze Zeiten T. F. WALL[6]), indem er große Kondensatoren zu beträchtlichen Spannungen auflädt und dann über eine Spule von verhältnismäßig wenigen Windungen entlädt.

4. Minimale Veränderungen der Kapazität eines Kondensators lassen sich durch Verstimmung eines Schwingungskreises mit großer Genauigkeit

5) W. STEUBING, Phys. [illegible]

messen. Diese Methode wird seit der Ausbildung der Technik der Elektronenröhren vielfach mit Erfolg angewandt, um sehr kleine Längen- oder Winkeländerungen zu messen

5. Auf einfache Weise erzeugt SUYEHIRO[7]) einen **Lichtblitz von großer Intensität** durch Explosion einer mit Quecksilber gefüllten Kapillare. Diese ist 5—10 mm lang, einige Zehntel mm dick, Wandstärke einige Hundertstel Millimeter. Parallel liegt eine Kapazität von 0,85 MF. Die nötige Spannung beträgt nur einige Volt.

6. Das Elektret. Der Name „Elektret" wurde von HEAVISIDE für im Volumen elektrisierte Dielektrika geprägt. EGUCHI[8]) beeinflußt geschmolzene Mischungen von Wachs und Harz während der Erstarrung durch ein elektrisches Feld und erhält so Platten mit kräftiger Oberflächenladung, welche weder durch Abwaschen, noch durch Abschaben der oberen Millimeter, durch Röntgenstrahlen, elektrische Felder oder Bestreichen mit der Bunsenflamme zerstört werden kann. In drei Jahren konnte keine Verringerung der Elektrisierung festgestellt werden.

---

[7]) KYOJI SUYEHIRO, Jap. Journ. of Phys. 1, 97. 1923.

[8]) MOTOTARO EGUCHI, Phil. Mag 49, 178. 1925

4923

Sachregister.

Namenregister.

5. Optik

6. Schwingungen einschließlich Akustik

7. Geophysik